

DER WANDEL DER ELEKTRIZITÄTSLEHRE
ZU OHMS ZEIT

Michael Heidelberger

1979

1970

DER WANDEL DER ELEKTRIZITÄTSLEHRE ZU OHMS ZEIT
Eine methodengeschichtliche Untersuchung
und logische Rekonstruktion

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Philosophie
an der Ludwig-Maximilians-Universität
zu München
vorgelegt von
Michael Heidelberger
aus München



Referent: Prof. Dr. Dr. Wolfgang Stegmüller

Korreferent: Dr. Ivo Schneider

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Juli 1978

Für N.

Inhaltsverzeichnis

0. Zusammenfassung	7
1. Begriff und Funktion der Theoretisierung	9
1.1 Soziale Faktoren	9
1.2 Interne Faktoren	12
1.21 Die Baconische Phase	13
1.22 Komplexitätsdruck	17
1.23 Alternative Möglichkeiten	19
1.24 Theoretisierung	23
2. Theoretisierungsansätze in der Elektrizitätslehre vor Ohm	29
2.1 Das "System des Atomismus" und seine Vorgeschichte	31
2.11 Unitarier und Dualisten: Das Problem der Anzahl elektrischer Materien	39
2.12 Chemiker und Kontakttheoretiker: Das Problem der Ursache galvanischer Erscheinungen	44
2.13 Das Problem der Wirkung: Erklärung der Elektrizitätsleitung	49
2.131 van Marum und Pfaff	50
2.132 Coulomb	56
2.133 Davy	63
2.2 Das "System des Dynamismus"	70
2.3 Anschauung und Mathematik	84
3. Ohms Theorie als ein Anfang theoretischer Physik in Deutschland	100
3.1 Ohms Theorie der Elektrizitätsverbreitung	102
3.2 Die Rezeption der Ohmschen Theorie	122
3.21 Hindernde Faktoren	122
3.22 Fördernde Faktoren	138
3.23 Weiterentwicklung	150

4. Logische Rekonstruktion und philosophische Einschätzung	161
4.1 Interner wissenschaftlicher Fortschritt in der Sicht der traditionellen Geschichts- schreibung	161
4.2 Wissenschaftlicher Wandel in Kuhns Metatheorie	165
4.3 Neun Ebenen, auf denen sich die Elektri- zitätslehre zu Ohms Zeit wandelt	179
4.31 Weltanschauliche Ebene	179
4.32 Normen der Theoriebildung	181
4.33 Einstellung zum Experiment	182
4.34 Einstellung zur technischen Verwertbarkeit	183
4.35 Modellbildung	185
4.36 Ebene der wissenschaftlichen Klassifikation	187
4.37 Organisation des Theoriebereichs	190
4.38 Ebene der zugrundeliegenden Meßtheorie	192
4.39 Definition der Grundbegriffe	195
4.4 Reflexion und Kritik des Begriffs der wissenschaftlichen Revolution	198
4.5 Rekonstruktion in Sneed's Metatheorie	234
4.6 Nochmals zur Theoretisierung	248
5. Abkürzungen	256
6. Bibliographie	257

0. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird versucht, das Phänomen des Wandels der Naturwissenschaft von einer neuen Seite her anzugehen. Anhand einer Fallstudie über den Wandel der Elektrizitätslehre zu Ohms Zeit soll gezeigt werden, daß sich philosophisch-systematische und historische Bemühungen um die Naturwissenschaft nicht auszuschließen brauchen, sondern sinnvoll ergänzen können.

Im ersten Kapitel werden die allgemeinen Tendenzen beschrieben, die in der Naturwissenschaft zu Beginn des 19. Jahrhunderts vorherrschend waren. Die beginnende Verschmelzung der baconischen Natursicht mit der mathematischen führte zu einer immer stärkeren Theoretisierung des Wissens über die Natur.

Das zweite Kapitel zeigt die Begriffe, Sichtweisen und Methoden der Elektrizitätslehre vor Ohm. Anhand einiger typischer Beispiele werden die spezifischen Probleme und Lösungsversuche deutlich gemacht. Obwohl die Forscher der damaligen Zeit zwei gegensätzlichen Lagern zugehörten, dem Atomismus und Dynamismus, haben sie sich doch von gemeinsamen metaphysischen Überzeugungen leiten lassen, die besonders das Verhältnis der Mathematik zur Natur betrafen.

Im dritten Kapitel wird Ohms Theorie vorgestellt. Die allmähliche Entstehung der neuen Begriffe der Ohmschen Theorie und ihre neuartige Verwendungsweise werden ausführlich analysiert. Es zeigt sich, daß Ohm über ganz

andere Sichtweisen und Normen als seine Vorgänger verfügte.

Aus der Tatsache, daß Ohm damit ein neues Paradigma für die Elektrizitätslehre eingeführt hat, können die Gründe für die ablehnende Haltung der damaligen Wissenschaftlergemeinschaft deutlich gemacht werden.

Im vierten Kapitel wird schließlich der Begriff des wissenschaftlichen Wandels von einer philosophischen Seite reflektiert. Es wird insbesondere gezeigt, welche Arten von wissenschaftlichem Wandel in Thomas Kuhns Wissenschaftsphilosophie im Gegensatz zu traditionellen Auffassungen erklärt werden können. Es werden die verschiedenen Ebenen, auf denen sich der Wandel der Elektrizitätslehre zu Ohms Zeit abgespielt hat, systematisch zusammengestellt und mit den Kategorien der Kuhnschen Theorie analysiert. In einem weiteren Schritt wird eine neue Explikation von Kuhns Begriff der wissenschaftlichen Revolution vorgeschlagen, die eine verbesserte Fassung der Überlegungen von Sneed und Stegmüller darstellt. Es zeigt sich, daß sich der Ohmsche Wandel nach diesen Kategorien logisch rekonstruieren läßt. Dazu ist schließlich erforderlich, daß die verschiedenen logischen Rekonstruktionen der vorohmschen und Ohmschen Begriffe als mengentheoretische Prädikate angegeben werden.

Zum Schluß wird zu zeigen versucht, daß die Theoretisierung der Elektrizitätslehre, wie sie sich mit der Ohmschen Wende abzuzeichnen beginnt, das Resultat eines Lernprozesses auf einer höheren, einer methodologischen Ebene darstellt.

1. Begriff und Funktion der Theoretisierung

1.1 Soziale Faktoren

In der Beziehung der Naturwissenschaften zur Gesellschaft werden in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts neue Dimensionen sichtbar. Einige davon lassen sich mit den Begriffen: Professionalisierung, Institutionalisierung und Internationalisierung umreißen.¹

Unter den Gelehrten, die sich mit Naturwissenschaft beschäftigen, finden sich immer häufiger solche, die ihren Hauptberuf der Naturwissenschaft widmen: der Typ des dilettierenden Amateurs, des reichen Müßiggängers, des Arztes oder Apothekers, der sich nebenher auf eigene Kosten mit Naturwissenschaft beschäftigt, wird abgelöst durch den Typ des professionellen Naturwissenschaftlers, der aus der Mittel- oder Unterklasse der Gesellschaft stammt und von staatlichen Institutionen, meist Universitäten bezahlt wird. Unter denen, die diesen neuen Beruf praktizieren, entwickelt sich allmählich ein Gruppenbewußtsein, das sich in der Gründung neuer naturwissenschaftlicher Institutionen niederschlägt: 1822 die "Gesellschaft deutscher Naturforscher und Ärzte", 1831 die "British Association for the Advancement of Science" und 1833 der "Congrès Scientifique de France". In ihren Statuten waren diese Institutionen weit exklusiver und anspruchsvoller,

1) Für das Folgende vgl. Mendelsohn 1964, bes. 4-7, 40-43 und 22-30; Mason 1962, 435-448; Merz 1965, 89ff, 158ff, 226ff; Schnabel 1934, 128ff., Kuhn 1975, 113ff.

was die wissenschaftliche Qualifikation ihrer Mitglieder anging, als etwa die Royal Society (gegründet 1662) oder als die Académie des Sciences (1666), bevor sie 1795 im Institut de France aufging, nachdem sie während der Revolution aufgelöst worden war.

Ungefähr gleichzeitig mit diesen Neugründungen beginnen sich die Naturwissenschaftler auf Einzelgebiete zu beschränken: der Naturforscher, der in allen Gebieten der Naturlehre mitreden kann, wird verdrängt vom naturwissenschaftlichen Spezialisten. Es beginnt ein Prozeß, der die Naturwissenschaften und die höhere Mathematik ins öffentliche Schul- und Bildungswesen, und damit auch in die Universitäten, systematisch und umfassend integriert. Von der École Polytechnique (1794) leitet sich eine neue naturwissenschaftliche Ausbildungsweise her, die die "physique expérimentale" und höhere Mathematik in gleicher Weise betont. Nach diesem Muster wird 1825 die erste deutsche Technische Hochschule in Karlsruhe organisiert; ein Jahr darauf richtet Liebig nach Abschluß seiner Studien in Paris das erste chemische Unterrichtslaboratorium an der Universität Gießen ein. Gleichfalls 1825 beginnt C. G. J. Jacobi seine Tätigkeit als "der Mathematiklehrer Deutschlands" (so P. G. Lejeune Dirichlet). 1826 erscheint erstmals Grelles "Journal für die reine und angewandte Mathematik" - wohl die wichtigste Mathematikzeitschrift der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts überhaupt. Und schließlich beginnt A. von Humboldt 1827 in Berlin seine aufsehen-erregenden Vorträge über "physische Weltbeschreibung"

zu halten.

Die bedeutsame Rolle, die die Französische Revolution den Naturwissenschaften und der Mathematik im Neuaufbau der Gesellschaft zumaß, wurde nun auch außerhalb Frankreichs anerkannt. Es beginnt ein verstärkter Informationsaustausch zwischen den Wissenschaftlern der einzelnen Staaten. Das führt dazu, daß sich die verschiedenen nationalen Eigenheiten in der Auffassung von Naturwissenschaft ganz allmählich nivellieren. Am hartnäckigsten hielt sich die romantisch-idealistische Naturphilosophie in Deutschland, die in ihrer extremen Form schon keine nationale Eigenheit mehr, sondern eine eigenständige und alternative weltanschauliche Wissensform zu nennen ist.

Die unterschiedslose Achtung naturwissenschaftlicher Leistungen wird auch durch Kriege nicht getrübt, sondern als völkerverbindende Errungenschaft der Aufklärung gefeiert: Mitten in den napoleonischen Kriegen erhält 1807 der deutsche Physiker Paul Erman für seine Untersuchungen der sogenannten Unipolarität elektrischer Leiter den Galvanischen Preis des Institut National in Paris.¹ Von Napoleon, der diesen Preis stiftete, wird auch berichtet, er habe 1796 in Pavia Befehl gegeben, das Wohnhaus Voltas von der allgemeinen Plünderung und Zerstörung auszunehmen.²

1) Seyffer 1848, 41

2) Thiers, Histoire de la Revolution, t.III, S.383
Zit. nach Becquerel 1858, X

1.2 Interne Faktoren

Gleichzeitig mit der Umgestaltung ihrer sozialen Bezüge verändern sich Teile der Naturwissenschaften auch intern: es findet ein Prozeß statt, der hier als Theoretisierung bezeichnet werden soll. Darunter verstehe ich eine besondere Form der Kondensation von Wissen, von der Merz gesagt hat, daß sie - zusammen mit der Extension von Wissen - allgemein den intellektuellen Fortschritt der Menschheit bestimme.¹ Für das 19. Jhdt. manifestiere sich diese Wissenskondensation vor allem in der Entwicklung einer korrekten Methode der Wissensvermehrung und zweitens in der Konkretisierung der Vorstellung von einer möglichen Wissensseinheit.²

Es mag zwar richtig sein, daß die induktive Methode, an die Merz beim ersten Faktor offensichtlich dachte, eine philosophisch befriedigende Theorie darstellt; ihre Relevanz für die tatsächliche naturwissenschaftliche Praxis ist jedoch immer mehr in Zweifel gezogen worden.³ Der zweite Faktor, die Vereinheitlichung von Wissen, bedarf sicherlich einer Aufgliederung und Ergänzung, um die Entwicklung der Naturwissenschaft im beginnenden 19. Jhdt. befriedigend charakterisieren zu können.

1) Merz 1965, 27

2) "But what our century has done is this: it has worked out and deposited in special terms of language a clearer view of the correct methods for extending knowledge, and a peculiar conception of its possible unity."

3) z.B. Kuhn 1961 . Vgl. auch Liebig 1863

1.21 Die Baconische Phase

Im 18. Jahrhundert war die Elektrizitätslehre überwiegend eine Baconische Wissenschaft.¹ Im Vordergrund stand das ungeordnete Ansammeln von Erfahrungen. Die damit verbundenen Vorstellungen waren anfänglich nur von einem vagen, meist unbewußt zugrundeliegenden Korpuskularismus geprägt. Die Theorien von Franklin (1751) und Volta (1800) haben ursprünglich nur einen sehr beschränkten Erklärungsereich. Im Versuch, diesen Bereich, sowie die Erklärungskraft der Theorien auszudehnen, stellt sich ein hochwillkommener Erfolg ein: die Theorien erweisen sich als eine reiche Quelle für Ideen, mit deren Hilfe man alle Arten von neuen Experimenten und Experimentanordnungen erfinden, sich neue Instrumente ausdenken, also überhaupt jede Menge neues Erfahrungsmaterial anhäufen kann. Das ursprüngliche, eigentlich theoretische Versprechen der Franklinschen und Voltaschen "Experimentrezepte", nämlich eine umfassende Erklärung aller elektrischer Phänomene zu liefern, wurde für diese so erweiterten Gebiete meist nicht oder nur ganz künstlich eingelöst. In der Frühzeit der Elektrizitätslehre wurde dies auch nicht als negativ empfunden: die Einstellung zu elektrischen Erscheinungen war die eines "bunten Empirismus", wie es Bachelard nennt. In dem Bilderbuch der elektrischen Phänomene "gibt es nichts zu begreifen, man muß nur schauen."²

Die Leydener Flasche wurde seit ihrer Entdeckung auf den Jahrmärkten in Schaubuden gezeigt³; 1804 bringt

1) Zu diesem Begriff siehe Kuhn 1961 und Kuhn 1975

2) Bachelard 1974, 41

3) ibid. S.43; Priestley 1772, I, 108; Albrecht 1885, 30

der Professor am Ulmer Gymnasium, Christian Lebrecht Rösling seine "Sammlung elektrischer Spielwerke für junge Elektriker" heraus und von 1801-1809 erscheinen zehn Bände des "Physikalischen Kinderfreunds" von G.U.A. Vieth. Auch in Franklins Werk finden sich mannigfaltige Beispiele für elektrische Spielereien zur Belustigung vornehmer Salons, die bis zu knisternden Funkenentladungen durch Küsse im Dunkeln reichten.

Die kindliche Freude an der Elektrizität machte auch vor den Universitäten nicht halt. Yelin sagt von der Elektrizitätslehre des Jahres 1780, als all die Zusammenhänge mit Chemie und Magnetismus usw. noch nicht gefunden waren: Die Elektrizität "diente mehr zur Ergötzung, als zur wissenschaftlichen Belehrung in den physicalischen Hörsälen, die, wie Hollmann in Göttingen zu sagen pflegte, ohne dem immer mehr Spektatores als Auditores enthalten."¹

Die Wirkung der elektrischen Erfindungen und Entdeckungen, besonders der Leydener Flasche (1746), der voltaschen Säule (1800) und des Elektromagnetismus eines stromdurchflossenen Leiters (1820 durch Oersted) auf die Phantasie der Menschen war ungeheuer. Besonders in Deutschland, wo die Romantik am stärksten wirkte, erregten sich die Gemüter. G.W. Muncke, damals Physikprofessor in Heidelberg, gibt davon folgende Schilderung:

1) Yelin 1822, 30

Kaum waren aber diese Nachrichten [über Oersteds Entdeckung] ins Publicum gekommen, als nicht bloß alle Physiker, sondern auch eine Menge Naturforscher, Ärzte, Dilettanten und sogar solche, welchen wissenschaftliche Forschungen übrigens fremd zu seyn pflegen, sich mit einer Leidenschaftlichkeit der neuen Entdeckung bemächtigten. Man kann den damaligen Enthusiasmus füglich demjenigen vergleichen, welcher sich äußerte, als die ersten aerostatischen Maschinen [der Gebrüder Montgolfier, 1783] ein bis dahin für unmöglich gehaltenes Problem löseten. ... Die Ursache einer so allgemeinen Theilnahme lag wohl hauptsächlich darin, daß die räthselhafte Potenz des Magnetismus, welche zum Überdruß forschender Physiker allezeit ganz isolirt und gleichsam bloß an das starre Eisen gebunden da gestanden hatte, jetzt auf einmal mit einer der allgemeinst verbreiteten Potenzen in Verbindung trat, theils an dem Imposanten einer merkwürdigen Thatsache, welche nach ermüdenden Spekulationen, namentlich in Deutschland, in ihrer ganzen Wichtigkeit hervortrat, theils endlich in der Leichtigkeit, womit sich diese merkwürdigen Erscheinungen hervorrufen ließen, und der Kleinheit der hierzu erforderlichen Apparate.

Was all diesen Experimenten mit elektrischen Apparaten einen Sinn gab, war die Hoffnung, durch das Herumprobieren endlich die Elektrizität in ihrer reinen Form darzustellen, sie gewissermaßen aus den bekannten Erscheinungen herauszudestillieren. In diesem Vertrauen auf eine Lösung in der Zukunft drückt sich eine Baconische Haltung aus. Es ist nicht so, daß eine Baconische Wissenschaft mit der Aufhäufung von Stoff notwendigerweise zu einem unerträglichen Komplexitätsgrad führen muß. Es gibt im Gegenteil genügend Lösungsverfahren, oder besser: Heuristiken, im experimentellen Umgang mit der Natur, die nach genügend langen Versuchsreihen all die Informationen, die mit jedem Experiment ja gesammelt werden,

1) Muncke 1827, 478

plötzlich überflüssig machen: Wenn der Stein der Weisen gefunden und das experimentum crucis durchgeführt ist, dann ist das Wissen, das in allen vorher geleisteten und noch unvollkommenen Versuchen zusammen kam, überflüssig geworden und kann vergessen werden.

In diesem Sinne ging man auch in der Elektrizitätslehre vor: Wenn einmal die Elektrizität an sich in ihrer reinen Form als Substanz vorliegt und hergestellt werden kann, dann kann man alle Mühen vergessen und die Theorie wird sich direkt in der Anschauung dieser Substanz ergeben. Prechtl schrieb in einem Brief an Gilbert: "An eine vollständige Theorie dieses Gegenstandes ist jetzt noch nicht zu denken, da die Phänomenologie noch nicht erschöpft ist; dann gibt sich die Theorie von selbst."¹

Der Erfolg dieses trial-and-error-Verfahrens ließ jedoch immer länger auf sich warten. Das weitgespannte Interesse an den "imposanten Tatsachen" der Elektrizitätslehre begann unter den Naturforschern schon Unmut und Überdruß zu erregen. Gilbert berichtet 1821 in seinen Annalen der Physik: "Mehrere meiner Leser haben sich gegen mich geäußert, sie gäben es auf, in diesem Gegenstande [Elektrizitätslehre und Galvanismus] mit fortzugehen, weil man alle Übersicht verliere".² 1822 berichtet er noch einmal vom "Mißvergnügen und Klagen über Überfüllung [der Annalen] mit electrisch-magnetischen Untersuchungen".³ Schließlich schreibt er 1823: "Klagen, meine Annalen wür-

1) Gilb. Ann. 68, 1821, 104

2) Gilb. Ann. 69, 1821, 65

3) Gilb. Ann. 72, 1822, 12

den mit electro-magnetischen Aufsätzen überfüllt, und die Mehrzahl der Leser abgeschreckt, sind Ursach, daß im vergangnen Jahrgange diese Materie nur selten berührt worden ist."¹

1.22 Komplexitätsdruck

Allmählich wurde die Menge der angesammelten Erfahrungen so erdrückend groß und ihre Beziehungen untereinander so undurchsichtig, daß ein Mißverhältnis eintrat zwischen einerseits dem Erfolg der bisherigen Vorstellungen und Heuristiken und andererseits dem immer geringer werdenden Grad an Schlüssigkeit und Überschaubarkeit, den die verfügbaren Theorien in diese Stoffmassen einzubringen im Stande waren. Anstatt neu auftauchende Rätsel und Probleme befriedigend und abschließend zu lösen wurden durch die naturwissenschaftliche Praxis immer mehr Rätsel erzeugt, die anfangs noch zur Belustigung und Anregung der Phantasie gut genug waren, allmählich aber den Zustand der Elektrizitätslehre immer paradoxer erscheinen ließen.

Schon nach Erfindung der Leydener Flasche mußte man die dadurch erzeugten Phänomene mit den Auffassungen von der Reibungselektrizität in Einklang bringen und das Phänomen der elektrischen Fische mußte erklärt werden. Später glaubte man in den Experimenten Galvanis einen tierischen Magnetismus festgestellt zu haben, dessen Zusammenhang mit der Medizin, der Physiologie, der Elektrizität selbst und der Chemie immer rätselhafter

1) Gilb. Ann. 75, 1822, 12

wurde; die elektrostatischen Erklärungen mußten ab 1800 mit Voltas Theorie in Zusammenhang gebracht werden; die Elektrolyse stellte eine faszinierende Verbindung mit der Chemie her; ab 1820 mußte man noch den Magnetismus mit berücksichtigen und 1822 die Thermoelektrizität sowie die sogenannte Kristallelektrizität des Turmalin.

Auch die Erklärung der vielfältigen Instrumente war alles andere als einheitlich. In einem zwischen zwei Trockensäulen pendelnden Metallkugeln glaubte man sogar ein perpetuum mobile gefunden zu haben.¹ Kurzum, die Physik kam nicht mehr nach, all die Probleme schnell genug zu lösen und auszuwerten und die Fülle der vielen, von Fachmännern und Scharlatanen gleichermaßen vorgeschlagenen Erklärungen zu verkraften und zu verarbeiten. Die Beschäftigung mit den kursierenden Theorien und durchgeführten Experimenten führte zu keiner allmählichen schrittweisen Lösung, wie man es sich eigentlich vorgestellt hatte, sondern zu einer steigenden Problematisierung.

Daß die Organisations- und Gestaltungskraft der Elektrizitätslehre weit hinter der wachsenden Fülle von Erscheinungen zurückblieb, wurde anfänglich nur als ein Zeitproblem gesehen: wenn man der Physik mehr Zeit gibt, wird sie ihre Händel eines Tages schon beilegen. So resümiert J.C. Fischer 1823 in seinem Physikalischen Wörterbuch: "Es ist also das eigentliche Wesen des so

1) Ostwald 1896, 364f; Gilb. Ann. 64, 1820, 46
Muncke 1829, 824

mächtigen Agens, der Elektrizität, bis jetzt noch [!] unerforscht."¹ Das relativ theoriefreie Herumprobieren in Baconischer Manier führte aber im Falle der Elektrizitätslehre zu keinem Ziel; die Bewältigung des Wissens über die Natur durch das zentrale Experiment ließ zu lange auf sich warten.² Allmählich wuchs daher die Bereitschaft, alternative Methoden, wenn auch widerstrebend, in Betracht zu ziehen und anzuwenden.

1.23 Alternative Möglichkeiten

Wir finden diese Einstellung z.B. bei C.H.Müller, der in den Anmerkungen zu Singers "Elementen der Elektrizität und Elektrochemie" einige Theorien über die Voltasche Säule kritisch betrachtet: "Vergleicht man auch nur einige der neuesten Verhandlungen hierüber, ... so sieht man aber, daß nicht nur jeder Theorie im Ganzen, sondern auch jeder Erklärungsweise eines speciellen Effektes und den zum Beweis angeführten Erfahrungen, und den aufgestellten verschiedenen Gesetzen immer wieder Ausnahmen entgegenstehen; denn alle Versuche, Erscheinungen der Natur aus dem Verhalten irgend eines Stoffes einer bestimmten Kraft, einer gewissen Wirkung erklären zu wollen, müssen mißglücken, da keine von diesen Potentialen je allein auftritt, sondern immer gleichzeitig ein Conflict von mehrern, den Körpern eigenthümlich verschie-

1) Fischer 1827, VIII, 562. Vgl. auch Pfaff 1827, 325 & 383 sowie Pfaff 1828, 1003f.

2) In der Vorstellung Ritters und einiger Theologen nahm dieses Zentralexperiment schon magische Formen an. Vgl. dazu Benz 1970 und Wetzels 1973.

denen Eigenschaften und Kräften entsteht, die sich wieder nach Verschiedenheit der Umstände in ihrer Thätigkeit verschiedentlich modificiren."¹ Müller gibt hier offensichtlich das Ziel der "reinen Darstellung der Elektrizität" auf. Er zieht aus diesem Zustand für sich eine Konsequenz, die ihn, ähnlich wie Goethe, zu einer Art von naturphilosophischer Skepsis führte:

In so weit [die Erforschung der Natur praktisch anwendbar ist] rechtfertigen sich alle besonderen Theorien über die einzelnen Naturactionen und haben ihren unlängbaren Werth: glauben wir aber, daß die Erscheinungen und Wirkungen in der Natur in der Art wirklich entstehen und sich äußern, wie wir sie nach unsrer Fassungskraft zu erklären suchen, und daß die Natur selbst aus diesen von uns unter sich abgesonderten Stoffen und Wirkungssystemen zusammengesetzt sey, wodurch sie zu einem bloßen Mechanismus wird; so verkennen wir ganz ihr Wesen, indem in ihr diese Absonderung verschiedenartiger Stoffe und diese Trennung vereinzelter Kräfte gar nicht statt findet, sondern sie sich überall und immer als ein in allen seinen Theilen thätiges, mit seinen Gesamtkräften als Einheit wirkendes, belebtes Organon documentirt. Es ist daher auch unmöglich, irgend jemals eine durchaus in allen Fällen sich richtig erweisende und genügende Theorie über irgend eine Klasse der Erscheinungen für sich besonders aufzustellen.²

Hier wird zwar nicht direkt eine neue naturwissenschaftliche Methode propagiert, der Anspruch der Naturwissenschaft und ihrer Erkenntnisfähigkeit jedoch sehr stark heruntergeschraubt. Einsicht in die Natur ist, wenn überhaupt, nur von der simultanen Erforschung aller lebendigen Kräfte der gesamten Natur zu erwarten: eine Sicht, wie sie typisch für die romantische Naturphilosophie in Deutschland war, die sich jedoch nicht immer

1) Singer 1819, 471

2) Singer 1819, VIII

mit der Anerkennung einer Grenze der naturwissenschaftlichen Erkenntnis zufrieden gab, sondern sie mit der ihr eigenen Methode zu überschreiten versuchte.

Singer selbst, wie es für die damalige Situation in England bezeichnend ist, wird von solchen Skrupeln nicht berührt. Sein Werk sieht er als eine Sammlung von Tatsachen, die teils nach geschichtlichen, teils nach einigen wenigen systematischen Gesichtspunkten locker geordnet ist:

Der besondere Fleiß, den ich auf die Anordnung¹ verwandt habe, hat es mir möglich gemacht, eine größere Sammlung von Thatsachen in einem einzigen Bande mitzutheilen, als man in irgend einem mir bekannten Werke findet, und von dieser Ordnung läßt sich auch die Verständigung der nur kurz berührten Gegenstände erwarten: denn so gehörig geordnete Materialien gleichen einer Verbindung von Steinen zu einem gewölbten Bogen; sie unterstützen sich wechselseitig, und bilden eine zusammenhängende Masse, in der jeder Theil, zum Daseyn und Bestehen des Ganzen wesentlich ist.¹

Hier wird also die Bewältigung des Materials durch eine ~~theorie~~geschickte theoriefreie Anordnung und durch Konzentration auf die wichtigsten Tatsachen erwartet. Die von Müller im obigen Zitat kommentierten Theorien der Volta-schen Säule tut Singer leichthin ab:

Es ist ... unnöthig, sich über diesen Theil des Gegenstandes, von dem unsre Kenntniß noch sehr unvollkommen ist, weitläufig auszulassen; eine Angabe der Thatsachen, die von jeder Theorie berücksichtigt werden müssen, verspricht daher mehr Nutzen, als eine umständliche Auseinandersetzung der verschiedenen Theorien, die man vorgetragen hat.²

Die Baconische Hoffnung auf eine Vervollständigung der Erfahrungen scheint hier noch relativ ungebrochen zu sein.

Jean Baptiste Biot in Frankreich³ kann eine solche

1) Singer 1819, S. V

2) Singer 1819, 265

3) Zur Situation der Elektrizitätslehre in Frankreich 1800-1820 vgl. Brown 1969

Einstellung nur tadeln. In der Vorrede zu seinem Lehrbuch der Experimentalphysik schreibt er, mit welchen Bedenken er der Öffentlichkeit ein Lehrbuch übergibt, "in welchem die Physik auf eine Art dargestellt ist, die sie ihres wesentlichsten Nutzens beraubt, entkleidet nämlich von mathematischen Ausdrücken und Methoden." In dieser Hinsicht teile er völlig die Meinung eines Engländers, der in einer lobenden Besprechung seines "Traité de physique expérimentale et mathématique" (1816)

sich gegen die, in England eingerissene, Gewohnheit erklärt, dem Publicum sogenannte populäre Anleitungen darzubieten, die im Grunde nichts anderes gewähren als eine Art tabellarischer Übersicht oder Inhaltsverzeichnis, mittelst deren ein oberflächlicher Leser obenhin erfährt, daß diese oder jene Classe von Erscheinungen einer Wissenschaft angehöre, und daß dies oder jenes Resultat seine Herleitung daraus gefunden habe; ohne je eine klare Einsicht zu erlangen, auf welchem Wege diese Erscheinungen beobachtet wurden, durch welche Ableitungsart sich die Resultate daraus ergaben, mit welchem Grade der Gewißheit sie sich annehmen lassen. 'Wenn der Lernende, sagt unser Kritiker, von allem diesem nichts weiß, wenn sein Geist einmal die Gewohnheit angenommen hat, sich mit der bloßen Nomenclatur der Wissenschaft zu begnügen, so kann man ihn in dieser Art so gelehrt machen, als man will, er wird darum im Grunde um keinen Schritt weiter vorgerückt seyn.'

Biot glaubt, den Nachteil einer solchen Darstellungsart überwunden zu haben, indem er eine Art deduktiver Ordnung in die Stoffmasse einführt und nur die Versuche auswählt, "die die wichtigsten Stützpunkte der Wissenschaft abgeben." Er sagt weiter:

Indem ich mich der Hülfe der algebraischen Sprache und mit ihr der entferntern theoretischen Folgerungen und ihrer sichersten Nachweisungen begab, glaube ich eine sichere Begründung jener Folgesätze noch

1) Biot 1824/5, I, VI f.

auf solchem Wege erreichen zu können, daß ich keine der Thatsachen übergang, welche zu ihrer Bewährung dienen können, so wie der Mittel, durch die man ihre Verkettung nachzuweisen vermag. So hoffe ich in gemeinfasslicher Sprache den wesentlichen Stoff der Wissenschaft selbst, nicht bloß ihre Oberfläche oder ihr Skelett geben zu können.

Aus den genannten Beispielen wird wohl hinreichend klar, daß der Problemdruck, der durch die Häufung disparater Erfahrungen in der Elektrizitätslehre entstanden war, für die ganze wissenschaftliche Welt spürbar wurde, am wenigsten vielleicht in England. Allerdings gab es verschiedene Auffassungen in der Frage, welche Strategie wohl am besten sei, diesen Problemdruck erfolgreich zu verringern, ohne zuviel neue Probleme zu schaffen. In Frankreich stand die Mathematisierung hoch im Kurs, in Deutschland das Streben nach Einheit und größtmöglicher Anschaulichkeit in der Darstellung eines Bereichs, und in England versprach man sich von der geschickten theoriefreien Anordnung und scharfsinnigen Durchführung wichtiger und zentraler Experimente eine Lösung. Wir wissen heute, daß sich zumindest in der Physik die mathematische Methode unter Einbeziehung der beiden anderen Faktoren durchgesetzt hat. Diese Entwicklung war weder notwendig, noch verlustlos, noch ohne Widerstände.

1.24 Theoretisierung

Nach diesen Bemerkungen können wir eine genauere Definition von "Theoretisierung" versuchen. Der Bereich, in dem der Theoretisierungsprozeß der Wende zum 19. Jahrhundert stattfindet, ist auf die Baconischen Wissenschaften beschränkt, und zwar auf diejenigen wie Elektrizitätslehre, Wärmelehre, Chemie, Biologie, Geologie, Kristallo-

1) Biot 1824/5, VIII

graphie usw., die über die Phase des "bunten Empirismus" schon hinausgekommen sind und deren in den letzten Jahrzehnten sprunghaft gewachsene Stofffülle nach einer Bewältigung verlangt.¹ Nicht betroffen von diesem Prozeß sind die klassischen Wissenschaften²: Astronomie, Harmonielehre, Mathematik, Optik und Statik, die schon in der Antike einen hohen Stand in ihren formalen Mitteln erreicht hatten, und ebenso die rationale Mechanik. Diesen Wissenschaften ist gemeinsam, daß sie wenig mehr als eine mäßige Verfeinerung der Alltagserfahrung als Erfahrungsbasis benötigen. Die Baconischen Wissenschaften hingegen erreichten ihren entwickelten Zustand nur dadurch, daß der Mensch durch Experimente "gewaltsam" in den Ablauf der Naturvorgänge eingriff und durch künstliche Erzeugung "unnatürlicher Bedingungen" die Alltagserfahrung weit transzendierte.

Die Funktion, die nun der Theoretisierung bei dieser Lage der Dinge zukam, wurde schon mehrfach umrissen: sie besteht in der wissenschaftlichen Reduktion der Komplexität einer ambivalent und chaotisch empfundenen Menge von stetig wachsendem Wissen. Dabei sollen während dieses Reduktionsprozesses die dabei neu auftretenden Probleme kontrollierbar bleiben und nicht auf einer/anderen Ebene zu einer neuerlichen Komplizierung führen. Es ist klar, daß die Theoretisierung nicht das einzige Mittel darstellt, dem diese Funktion in der Entwicklung der Naturwissenschaften zukommen kann.³ Wir haben schon eini-

1) 1740 waren 600 Tierarten in der Zoologie bekannt, 1840 allein viermal so viele Schlupfwespen. (Lepénies 1976, 17.) Von 1775-1818 wurden 21 neue chemische Elemente entdeckt. (Bryk 1909, 125.)

ge andere Möglichkeiten in dieser Richtung genannt:
So kann auch z.B. die Spezialisierung der Wissenschaftler
und damit der wissenschaftlichen Disziplinen zu einer
Informationsbewältigung führen.

Gerade aber dieser letzte Weg war besonders in
Deutschland nicht unbegrenzt weit gangbar. Der Grund
dafür ist im deutschen Universitätssystem zu suchen
(und natürlich auch in den begrenzten finanziellen
Mitteln und dem begrenzten Interesse der Öffentlich-
keit): das ständige Zusammenleben von Wissenschaftlern
verschiedenster Sparten an der Universität, das Bewußt-
sein von der Einheit aller Wissenschaften, die Fundierung
auch der Naturwissenschaften in der Philosophie machte
die vollkommene Abspaltung verschiedener Wissensgebiete
voneinander unmöglich.¹

Und eine weitere Art und Weise der Reduktion ha-
ben wir genannt: die Baconische. Im Gegensatz zur Theo-
retisierung, die eine Umorganisierung und Bewältigung
schon tatsächlich vorliegender Informationen darstellt,
ist die Baconische Reduktionsweise auf der Ebene der
physikalischen Wirklichkeit selbst wirksam. Reduktion
durch Häufung von Experimenten, durch Suche nach dem

2) S.24: vgl.dazu Kuhn 1961 und Kuhn 1975

3) S.24: Zur Komplexitätsreduktion allgemein vgl. Luhmann 1968

1) Vgl. Merz 1965, 171: "Such an idea [of the universal
all-embracing edifice of human knowledge], the use of
such a term [Wissenschaft], could only be born and deve-
loped where the different faculties, the various branches
of knowledge, lived habitually, for many ages, under the
same roof, coming into habitual contact, and learning
to regard each other as members of one family, as inte-
gral parts of one whole."

experimentum crucis. Die Theoretisierung ist demgegenüber ein Prozeß, der die Ebene der reinen Empirie, der nackten Tatsachen, übersteigen möchte.

Nachdem so oft gesagt wurde, was Theoretisierung nicht ist, soll eine direkte Definition hier versucht werden:

X und Y seien Satzmengen, die Wissensformen über die Tatsachenbereiche B_X bzw. B_Y ausdrücken.

Es sei Y theoretisiert im Vergleich zu X genau dann, wenn (1) $B_X \subseteq B_Y$; und der eventuell vorhandene Überschußgehalt von B_Y über B_X (also $B_Y \setminus B_X$) sei unabhängig von Y.

(2) Y kann B_Y in einem wesentlich größeren Ausmaß mit weniger Mitteln konzeptuell und kognitiv organisieren als das X mit B_X kann (d.h. mit weniger Mitteln mehr Tatsachen aus B_Y erklären, vorhersagen, systematisieren, verknüpfen, Rätsel lösen, vereinheitlichen usw.)

(3) Die in (2) beschriebene Leistung von Y wird dadurch erbracht, daß sich die Sehweise, mit der Y den Bereich B_Y auffasst, unterscheidet von der Sehweise, die X in Bezug auf denselben Bereich beinhaltet.

Dazu einige Erläuterungen:

Zu (1): Seit längerem ist es nun in der Wissenschaftstheorie zum Allgemeinplatz geworden, daß (Beobachtungs-)aussagen über Tatsachen theorieabhängig (hier müßte man sagen: Wissensform-abhängig) sind. Die Bedingung(1)

soll sicherstellen, daß Y nicht schon deswegen als theoretisiert angesehen werden kann, weil diese Wissensform ein erweitertes Wissen beinhaltet über einen Bereich von Tatsachen, der im Lichte der Wissensform X umstritten ist und nur von Y akzeptiert wird. Dazu ein Beispiel, auf das wir später noch einmal zurückkommen werden: Symmer glaubte, in einem stromdurchflossenen Leiter flössen zwei gegensätzliche Elektrizitäten aufeinander zu. Franklin war der Meinung, es gäbe nur eine Elektrizität, die in zwei Zuständen - Mangel und Überfluß - vorkommt. Symmerianer stellten fest, daß bei einer Entladung von Elektrizität durch die Luft von einer Spitze in eine andere Funken aus beiden Spitzen herauskommen. Dagegen sahen Franklinianer bei der Wiederholung der Experimente Funken nur aus einer Spitze in die andere hinüberfliegen. Also wäre nach (1) der Symmerianer noch nicht überlegen.

Zu (3): Darin liegt die eigentliche Bedingung, die die Theoretisierung von anderen Formen der Komplexitätsreduktion unterscheidet. Die anderen Formen der Reduktion kommen entweder durch eine kumulierende, systematische und erschöpfende Anwendung im großen Stil von eigenen, bereits ausgebildeten Kriterien zustande (Baconische Methode, Spezialisierung¹) oder durch externe Faktoren (ebenfalls

1) oder empirische Verallgemeinerung im Sinne von Ernst Mach als bloße Ökonomisierung

Spezialisierung, Institutionalisierung, Verdrängung). Die Bedingung (3) stellt also sicher, daß es sich bei der Leistung der Theoretisierung um einen neuen kognitiven Faktor handelt und nicht um die spezielle Anwendungsweise schon bestehender kognitiver Faktoren.

Bei dieser Unterscheidung stütze ich mich auf Max Scheler, der zwei prinzipiell unterschiedene Arten der Wissensdynamik sieht: nämlich "ob die Denk-, Wertschätzungs- und Anschauungsformen der Welt selber einer Veränderung unterliegen, oder nur ihre Anwendung auf die quantitativ und induktiv erweiterten Erfahrungsmaterialien."¹

In diesem Sinne meine ich, daß die Theoretisierung eines Erfahrungsbereiches eher der Veränderung der Denk-, Wertschätzungs- und Anschauungsformen, unter denen dieser Bereich aufgefaßt wird, zuzurechnen ist als der konkreten und erschöpfenden Ausführung und Ausdifferenzierung eines Anwendungsprinzips, das von einer gegebenen Anschauungsform schon impliziert wird.

In gewissem Sinne ist mit diesen Bedingungen versucht worden, einen ganz speziellen Typ in der Wissenschaftsentwicklung zu charakterisieren und zwar einen solchen Veränderungstyp, der beim Übergang einer vorparadigmatischen Wissenschaft zu einer paradigmatischen oder beim Paradigmenwechsel selbst vorkommen kann.

1) Scheler 1926, 16f.

2. Theoretisierungsansätze in der Elektrizitätslehre vor Ohm

Nach J.W.Ritters Tod (1810) verschwindet allmählich die romantische Physik und mit ihr die relativ theoriefreie Suche nach dem "Zentralphänomen" der Natur und das Baconische Bestreben, die Elektrizität ihrem Wesen nach qualitativ darzustellen. Mit Oersteds Entdeckung flackern diese Ideen nochmals kurz auf, ohne sich jedoch durchzusetzen. Stattdessen entstehen zwei unterschiedliche theoretische Ansätze, die das Experiment nicht mehr direkt als heuristisches Instrument zum Herausdestillieren der Elektrizität an sich verstehen, sondern als Instrument der Bestätigung oder Widerlegung ihrer theoretischen Ansichten.

Anstatt die Offenbarung über das Wesen der Elektrizität direkt im Experiment zu suchen, werden nun Theorien über das Wesen der Elektrizität substituiert, die eine mögliche Darstellung vom Wesen der Elektrizität hypothetisch vorwegnehmen und von dieser "Wesensschau" aus die Fülle des Stoffes organisieren wollen. Als Theoretisierungsmittel werden qualitative Modellvorstellungen von der Ursache und dem Wirken der elektrischen Erscheinungen entwickelt. Die Modellvorstellungen funktionieren dabei als der einheitliche Gesichtspunkt, unter dem die disparaten Erscheinungen anschaulich zusammengefaßt werden können.

Dazu ein Zitat des Heidelberger Physikprofessors
Muncke, der 1836 in Gehlers Physikalischem Wörterbuch
schrieb:

Mit Grunde muß man nämlich jede Bemühung, das
Wesen der Materie im Allgemeinen zu ergründen,
so lange gänzlich zurückweisen, als noch nicht [!]
unwidersprechlich entschieden ist, ob es nur eine
oder zwei elektrische Materien giebt, ob diese
mit dem Magnetismus identisch oder davon verschie-
den ist, ob die Lichterscheinungen auf Vibrationen
oder auf der Emanation eines Lichtäthers beruhen,
u.s.w.

Auf der einen Seite stehen die Atomisten, die die
Elektrizität als einen imponderabilen Stoff, ein speziel-
les Fluidum ansehen. Sie sind noch am engsten mit der
Baconischen Naturwissenschaft und der von Newtons "Opticks"
herstammenden Tradition verbunden. Ihnen gegenüber
stehen die Dynamisten, die davon ausgehen, daß die
elektrischen Erscheinungen in nichts anderem als in
einer "polaren Tätigkeit der Materie", einer Manifesta-
tion einer Kraft oder mehrerer Kräfte bestehen, die
durch gegensätzliche Prozesse erregt werden.

1) Muncke 1836, 1404

2.1 Das "System des Atomismus" und seine Vorgeschichte¹

Das "System des Atomismus", wie es genannt wurde, ist von ca. 1780 - 1840 als eine programmatische Richtung in der Physik und Chemie Deutschlands etabliert. Seine Wurzeln hat es in der "Korpuskularphilosophie" des 18. Jahrhunderts. Im 17. Jahrhundert waren Ideen des antiken philosophischen Atomismus wiedererweckt worden. Nach dieser Lehre, besonders von Gassendi, Boyle und Hooke vertreten, besteht Materie aus kleinsten ausgedehnten Materiebausteinen, den Atomen, die unzerstörbar und undurchdringlich sind. Die "Korpuskularphilosophie" fügte dieser Überzeugung noch hinzu, daß alle Phänomene der Natur durch rein mechanisch beschreibbare Wirkungen dieser Atome aufeinander zustandekommen und dadurch erklärt werden können. Durch Newton wurde der Korpuskularismus zur herrschenden Tradition der Naturwissenschaft im 18. Jahrhundert. Genauer gesprochen leiten sich von Newton zwei mehr oder weniger getrennte korpuskularistische Traditionen her: eine mehr mathematische, die auf die "Principia" (1687 1.Aufl.) zurückgeht und eine mehr physikalisch-experimentelle, die sich hauptsächlich auf die zweite englische Ausgabe der "Opticks" (1717) beruft.

Beiden Newtonischen Traditionen ist gemeinsam, daß sie als mechanisch beschreibbare Wirkungen nicht nur Stoßprozesse zuließen wie die Cartesianer, sondern auch Fernwirkungen: die einzelnen Atome wirken durch immaterielle

1) vgl. dazu Thackray 1970 passim; Cohen 1956, 151-198; Muncke 1836; Scott 1970, 3-21.

anziehende und abstoßende Kräfte aufeinander. Für den experimentellen Korpuskularismus waren Atome entweder in Vakuum eingebettet oder schwammen in einem Medium, dem elastischen Äther. Die Atome des Äthers liegen im Gegensatz zu den anderen Atomen dicht an dicht und sind ohne Gewicht.

Mit seinen "Opticks" hatte Newton versucht, Methoden einzuführen, nach denen man aus experimentellen Daten Rückschlüsse auf geometrische und physikalische Eigenschaften der Korpuskel ziehen kann, z.B. ihre Größe und Gestalt oder die Art der interatomaren Kräfte. Da Materie porös ist, Atome also durch Zwischenräume voneinander getrennt sind, läßt sich die Transparenz gewisser Materieteilchen dadurch erklären, daß Lichtpartikel durch diese Zwischenräume hindurchtreten können. Durch optische Phänomene kann erschlossen werden, wie dicht die Atome eines Stoffes liegen - Optik ist also ein Schlüssel zur Analyse der Materie. Auf ähnliche Weise können auch thermische und elektrische Phänomene einer Untersuchung der Korpuskularstruktur der Materie dienen. Durch die Annahme eines (dem Licht ähnlichen) Äthers in den Opticks von 1717 versuchte Newton auch die Gravitation durch einen korpuskularen Mechanismus zu erklären. Seine Haltung in diesem Punkt ist jedoch nicht eindeutig. In der Schrift "De Natura acidorum" schließlich gibt Newton durch die Annahme spezieller interatomarer Nahwirkungskräfte eine Erklärung für die chemische Affinität, die zu vielen Weiterentwicklungen

in der Folgezeit inspirierte.

Newtons Ätherhypothese und die Methode der Opticks wurden von vielen seiner Nachfolger als ein den "Principia" ebenbürtiger Erfolg angesehen. Im Laufe des 18. Jahrhunderts wurde es immer klarer, daß das Cartesische Programm undurchführbar ist, d.h. Gravitation, Magnetismus, elektrische Phänomene und chemische Affinität nicht auf die elastische Stoßmechanik zurückführbar sind. Sobald die Idee der Fernwirkung von Kräften sich durchgesetzt hatte, lag es nahe, sich auch diese Phänomene als Kraftwirkungen von speziellen Korpuskeln zu denken. Zu dem Äther gesellten sich noch weitere "Imponderabilien", wie gewichtslose Atome genannt wurden: Phlogiston, Licht, Magnetismus und schließlich Elektrizität - zeitweise davon getrennt gedacht auch der Galvanismus - und andere mehr. (Ob Wärme auch als imponderabler Stoff zu denken war, blieb umstritten.) Durch die Annahme dieser Imponderabilien und ihrer spezifischen Kraftwirkungen ergaben sich Erklärungen die der experimentell-spekulativen Newtonschen Tradition natürlich und zwanglos schienen und außerdem den Vorzug hatten, einer mathematischen Behandlung (zumindest prinzipiell) zugänglich zu sein.

Die mehr mathematisch-deduktiv ausgerichtete Tradition der Newtonschen Principia konzentrierte sich mehr auf diese mathematisch beschreibbaren Eigenschaften der Korpuskel. Die Existenz von Fernwirkungskräften wurde als Faktum konstatiert und jede weitere Hypothese über

ihre eigentliche Natur, wie etwa die Ätherhypothese, als (zumindest für die mathematische Behandlung) überflüssige Spekulation gesehen. Roger Boscovich versuchte 1758 die Leibnizsche Monadenlehre und Newtons System in einer Synthese zu vereinigen, indem er die Atome und ihre Kraftwirkung als einen ausdehnungslosen mathematischen Punkt ansah. Boscovich konnte zwar keine neuen und besseren Erklärungen für physikalische Phänomene geben, aber sein System wurde wichtig, weil hier der Versuch unternommen war, Materie und Kraft in eins zusammenzudenken. Sein Einfluß war auch noch im 19. Jahrhundert spürbar. Seine Lehre kam z.B. den Ideen Humphry Davys und besonders Faradays sehr entgegen.

Von der Idee des Boscovich-Universums war es nur noch ein kleiner Schritt zur Idee, überhaupt nur noch Kräfte als konstituierende Elemente der Natur anzunehmen.¹ Diese Ansicht, die wir dem Korpuskularismus nun nicht mehr zurechnen können, findet sich im 18. Jahrhundert schon früh vereinzelt in England - so bei Robert Green 1727 und Gowin Knight 1748. Durch Immanuel Kants "Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft" von 1786 gewann eine ähnliche Lehre auch in Deutschland an Einfluß. Das naturphilosophische "System des Dynamismus", das sich daraus entwickelte, wird weiter unten behandelt werden. Indirekt wirkte Kant jedoch auch auf die korpuskularistische Physik ein: Dadurch, daß er die atomistische Idee zum Streitpunkt erhob, wie das vor ihm schon einmal Leibniz getan hatte, brachte er die Atomisten dazu, sich

1) vgl. dazu Muncke 1836, 1412f.

der Grundlagen ihrer Überzeugung klarer zu werden und auf allen möglichen Gebieten nach Beweisen für den Atomismus zu suchen.

Für die Naturwissenschaft der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts ist in Deutschland jedoch nicht die kantische, sondern die experimentell-newtonsche Tradition die vorherrschende. Carl Wenzel und J.B. Richter z.B. versuchten vor Dalton, die mit Hilfe interatomarer Kräfte erklärte chemische Affinität zu quantifizieren. Dies gelingt dann Dalton, der nicht mehr Kräfte, sondern Atomgewichtsrelationen der Quantifizierung zugänglich macht. Damit wird das Atom zum Gegenstand der experimentellen Chemie und immer weniger zum Gegenstand philosophischer Überlegungen.

Auch auf dem Gebiet der Elektrochemie, speziell in der Fassung von J.J. Berzelius, zeigte sich das atomistische System erfolgreich. Berzelius nahm Atome von gleicher Größe und gleicher sphärischer Gestalt an und sah in den chemischen Prozessen im wesentlichen eine Neutralisation von Atomen, die auf verschiedene Weise elektrisch geladen sind.

Ein weiterer Erfolg des Korpuskularismus, der besonders in Deutschland wichtig war für die Auseinandersetzung des Atomismus mit dem Dynamismus, war die Ableitung der Kapillarwirkung aus dem Gravitationsgesetz durch Laplace (1805). Dieses Ideal wollten die Atomisten in allen Gebieten der Physik und Chemie, besonders jedoch

in der Physik der Imponderabilien erreichen. Überhaupt liegt gerade in der Einstellung zu den Imponderabilien wohl der Hauptunterschied zwischen der Korpuskularphilosophie des 18. Jahrhunderts und dem Atomismus des 19. Während zumindest noch in der Frühphase des Korpuskularismus Imponderabilien eher mit schlechtem Gewissen eingeführt wurden, wurde der Atomismus gerade auf dem Gebiet der Imponderabilien vom dynamistischen Gegner gezwungen, nicht bei den Andeutungen stehenzubleiben, die man in Newtons Opticks findet, sondern die Notwendigkeit der korpuskularen Hypothese mit neuen gewichtigen Argumenten und Experimenten zu belegen.

In der Chemie und für die Kapillarwirkung und auf anderen Gebieten konnte der Atomismus auf Erfolge verweisen. Aber im wichtigsten und umstrittensten Gebiet der Imponderabilien-Physik, nämlich der Elektrizitätslehre, ließen ähnliche Erfolge auf sich warten. Zwar hatte Coulomb 1785 in guter mathematisch-newtonischer Tradition gezeigt, daß - analog zu Newtons Gravitationsgesetz - die Kraft zwischen zwei elektrischen Ladungen umgekehrt proportional zum Quadrat ihres Abstandes ist. Es fehlte jedoch eine ähnliche Methode für den von Volta vorgeführten Elektrizitätsfluß über längere Zeit hinweg und, was besonders wichtig war, es fehlten völlig die Methoden, mit deren Hilfe man die korpuskulare Beschaffenheit der Elektrizität hätte beweisen und untersuchen können, wie man das analog für Licht, Wärme und die chemischen Elemente nach experimentell-newtonischer Manier ja getan hatte. Coulombs Ergebnisse reichten nicht aus, die Korpuskularstruktur, das "Wesen" der Elektrizität zu bestimmen.

In seinem Artikel über Elektrizität im Gehlerschen Wörterbuch von 1827 zählt Pfaff nicht weniger als 21 verschiedene Meinungen vom Wesen der Elektrizität auf, die im Laufe der Zeit vertreten worden seien.¹ Es sind dies Vorstellungen, die der elektrischen Flüssigkeit bzw. den Flüssigkeiten verschiedene chemische Eigenschaften zuschreiben oder sie mit verschiedenen Stoffen oder Mischungen davon identifizieren. So finden sich z.B. Auffassungen, Elektrizität sei Phlogiston oder Feuer, oder vom Feuer gesättigte Luft, oder Sauerstoff, Wärme bzw. Wärmestoff, Licht usw. usw. Ganz in diesem Sinne stellte die Batavische Societät der Wissenschaften in Utrecht eine physikalische Preisfrage für den 1. Okt. 1803: "Wie ist die electriche Materie beschaffen? Ist sie zusammengesetzt? Was hat sie für Bestandtheile? Was für chemische Veränderungen leidet sie, indem sie sich mit andern Körpern vereinigt, und was für Veränderungen bringt sie in diesen Körpern hervor?"²

In dem oben genannten Artikel zieht C.H. Pfaff vor der Schilderung der verschiedenen Hypothesen das Resümee, daß die Wissenschaft in dieser Frage seit langem überhaupt nicht weiter gekommen sei:

So ausgedehnt nach dieser kurzen Darstellung das Gebiet unserer Erfahrungen und Kenntnisse in der Electricitätslehre erscheinen mag, so müssen wir doch gestehen, daß wir noch [!] lange nicht tief genug in das Innere der Kraft eingedrungen sind, wie am deutlichsten die gleich folgende Aufzäh-

1) Pfaff 1827, 350ff.

2) Gilb. Ann. 10, 1802, 388

lung der mannigfaltigen Hypothesen über die Natur der E. darthun wird, von denen zwar die meisten veraltet sind, aber doch noch mehrere wesentlich abweichend sich gegenüber stehen, ohne daß irgend eine derselben bis jetzt die hierbei vorkommenden Probleme genügend zu lösen im Stande wäre. Man kann auch hier einwenden, was für andere Sphären der Wissenschaft gilt, daß die Wurzel umso tiefer geht, und umso verborgener wird, je mehr sich der Stamm einer Wissenschaft in Aesten und Zweigen ausbreitet.¹

Interessant ist, daß Pfaff von "veralteten" Theorien spricht. Trotz vieler Versuche läßt sich aber noch nichts sicheres vom Wesen und der Beschaffenheit der Elektrizität sagen. Pfaff hält es zumindest für erwiesen, daß keine der elektrischen Flüssigkeiten mit Wärme oder Licht identisch sei. "Ebenso unleugbar ist aber auch", fährt Pfaff fort, "daß sie mit diesen Imponderabilien in einem genauen Verkehr stehen, der jedoch bis jetzt noch nicht vollkommen genügend aufgeklärt werden konnte."² Und an einer anderen Stelle heißt es: Die Kraft, die in der Voltaschen Säule "als thätig angenommen wird, ist in gewissem Sinne eine Qualitas occulta, da ihre Abhängigkeit von andern Eigenschaften der Körper und ihr Zusammenhang mit diesen, die sich in so vielen Verhältnissen aussprechen, in tiefes Dunkel gehüllt bleiben."³

In dieser Situation können auch quantitative Messungen nichts ändern. Es kann nämlich keine absolute Messung der Elektrizität geben, so Pfaff, solange sie "noch nicht für sich dargestellt ist."⁴

Angesichts dieser Lage scheint es die Strategie der atomistischen Forscher gewesen zu sein, die Frage nach

1) Pfaff 1827, 325
2) ibid. 383
3) Pfaff 1828, 1004
4) Pfaff 1827, 681

dem Wesen der elektrischen Flüssigkeit(en) zwar als legitim aufrecht zu erhalten, aber ihre Beantwortung erst einmal auf später zu verschieben. In der Zwischenzeit gilt es, entweder noch mehr Erfahrungen zu sammeln und/oder Experimentabläufe mithilfe der abstrakten atomistischen Hypothese besser und umfassender zu erklären. Wenn man schon nicht den Stoff, aus dem die Elektrizität besteht, identifizieren kann, so soll die Erklärung wenigstens mit Hilfe einer allgemeinen atomistischen Vorstellung funktionieren. Das atomistische Theoretisierungsprogramm besteht also in einer Verschiebung und abstrakteren Fassung der "Wesensfrage": Wenn die Elektrizität irgend ein bestimmter Stoff (bzw. Verbindung oder Vermischung von Stoffen) ist, dann gilt für sie mindestens das, was man von Materie schlechthin sagen kann. Daraus ergibt sich die Forderung, die Vorstellung von der Elektrizität als einem materiellen Stoff überall "durchzuspielen", sowie die Ursache und Wirkung der Elektrizität in diesem Sinne befriedigend zu erklären.

2.11 Unitarier und Dualisten: Das Problem der Anzahl elektrischer Materien

Hinsichtlich der Anzahl der wirkenden elektrischen Materien standen sich innerhalb der atomistischen Schule lange Zeit zwei Gruppen gegenüber, die sogenannten Unitarier und Dualisten!¹ Ausgehend von Franklins (und auch Voltas) Theorie gingen die Unitarier davon aus,

1) vgl. Cohen 1956, 548-554; Hoppe 1884, 56ff.

daß es nur eine elektrische Materie gebe. Am positiven Teil einer Leydener Flasche bzw. am positiven Pol einer Säule besteht ein Überfluß an elektrischem Fluidum, während am negativen Teil bzw. Pol ein Mangel besteht. Die elektrischen Phänomene werden nun dadurch erklärt, daß die einzelnen Teilchen der elektrischen Materie sich untereinander abstoßen, aber vom Elektrizitätsträger angezogen werden. Eine Leitung der Elektrizität kommt dadurch zustande, daß ein Mangel und Überfluß an Elektrizität sich ausgleichen.

Robert Symmer ist der eigentliche Begründer der dualistischen Theorie.¹ Die elektrischen Erscheinungen werden nun durch die Wirkungen zweier verschiedener elektrischer Fluida erklärt, des positiven und des negativen. Teile der gleichen elektrischen Flüssigkeit stoßen sich ab, während ungleichnamige Flüssigkeiten sich anziehen. Im natürlichen Zustand binden sich beide Elektrizitäten an einander. Durch Reiben oder eine andere Form der Elektrizitätserregung werden die Flüssigkeiten von einander getrennt, d.h. das elektrische Gleichgewicht gestört. Elektrische Strömung kommt dadurch zustande, daß die beiden elektrischen Flüssigkeiten gegenläufig im Leiter sich aufeinander zu bewegen und durch die Bindung aneinander den natürlichen Zustand herbeiführen.

Zur Zeit Ohms scheinen die meisten atomistisch orientierten Physiker in Deutschland von der dualistischen Theorie ausgegangen zu sein. C.H.Pfaff, der 1824 noch

1) Philosophical Transactions 51, 1759, 1ff. Symmer griff auf Vorstellungen von Du Fay zurück.

die Franklinsche These vertrat¹, schreibt 1827:

Durch die Entdeckung des Galvanismus hat endlich die dualistische Theorie das entschiedenste Übergewicht über die Franklin'sche erhalten. Die französischen, die meisten deutschen und englischen Physiker haben sich für dieselbe erklärt, doch glänzen auch noch auf Seiten der Unitarier einige große Namen, und schon die Autorität eines Volta, jenes ruhmbedeckten Nacheiferers von Franklin würde sehr entscheidend seyn,² wenn nicht die Macht der Gründe entgegenstände.

Für die Dualisten fehlte es an Beweisen für die Franklinsche Behauptung, daß derjenige Zustand, der elektrisch positiv genannt wird, auch tatsächlich einen Überschuß an Elektrizität besitzt. Die Benennung durch - und + mußte willkürlich erscheinen. Als entscheidend für die dualistische Theorie wurden Versuche angesehen, bei denen an die etwas auseinandergerückten und zugespitzten Pole einer Elektrisiermaschine eine Kerzenflamme oder Räucherkerze gebracht wurde. Der Rauch bzw. die Flamme wurde von beiden Polen abgestoßen, insbesondere auch vom negativen, anstatt von ihm angezogen oder eingesaugt zu werden, wie es die Franklinsche Theorie eigentlich erfordern würde. Wenn also aus positiven und negativen Spitzen eine Ausströmung von Elektrizität nachgewiesen werden kann, ist die dualistische Theorie bestätigt. Ähnliche Bestätigungen wurden in den verschiedenen Lichterscheinungen gesehen, die an den positiven und negativen Spitzen einer Elektrisiermaschine oder Leydener Flasche zu sehen waren.³

Allerdings waren diese Versuche damals nicht ganz

1) Pfaff 1824, 16

2) Pfaff 1827, 349

3) Pfaff 1827, 336-347 bringt eine Zusammenstellung der damals bekannten Versuche und Argumente; ebenso Fischer 1823, 539-556 und Muncke 1829, 825

eindeutig. Häufig wurde ein und derselbe Versuch, je nachdem welcher Physiker ihn durchführte, als Beweis für die eine oder andere Richtung angesehen. Dem schwedischen Forscher Ekmark fiel auf, daß die Wahrnehmung elektrischer Phänomene je nach Einstellung anders ausfällt: "Die meisten Beweise für die Franklinsche Ansicht beruhen auf dem Urtheile des Auges; und wie sonderbar ist es, daß es dem Einen scheint, der Funke gehe aus dem electrisirten Leiter, dem andern, er gehe in denselben, weil sie glauben, eins von beiden sey nothwendig."¹

Zu diesen Versuchen kamen noch Überlegungen mehr theoretischer Art. Man glaubte, die dualistische Theorie könne einige elementare Sachverhalte einfacher und eleganter erklären. Die Franklinsche kann zwar auf eine einfache Weise darlegen, warum positive Körper sich abstoßen. Das ergibt sich aus der Annahme einer elektrischen Flüssigkeit, deren einzelne Teile so beschaffen sind, daß sie sich gegenseitig abstoßen. Um jedoch zu erklären, warum sich dasselbe Phänomen auch bei negativ geladenen Körpern, in denen die Teile der Flüssigkeit fehlen, findet, muß die Franklinsche Theorie die Luft zuhulfe nehmen: Die negativen Körper ziehen das in der Luft befindliche elektrische Fluidum an. Dadurch kommt es zu einer Ansammlung von Elektrizität in dem Maße, wie sie in den negativen Körpern fehlt. Im selben Grad wächst auch die ^{ge}gegenseitige Abstoßung der elektrischen

1) Gilb. Ann. 23, 1806, 437

Teilchen in der Luft, was dazu führt, daß nun auch die negativen Körper abgestoßen werden. Die dualistische Theorie braucht sich einer solchen Hilfshypothese nicht zu bedienen, sondern kann die negative Abstoßung ganz parallel und analog zur positiven erklären.

Hinzu kam noch, daß der Versuch der Berechnung der Kräfte, die bei den Abstoßungen und Anziehungen im Spiele sind, nach der Franklinschen Theorie eine weitere Hypothese notwendig zu machen schien. So glaubten Aepinus und später Cavendish¹ annehmen zu müssen, daß nicht nur die Teilchen der elektrischen Materie sich abstoßen, sondern überhaupt alle Teilchen jedes materiellen Körpers. Daß tatsächlich feste Körper existieren und nicht auseinander fallen, soll nur der elektrischen Materie und ihrer Anziehungskraft zu verdanken sein, die der abstoßenden Kraft der Körper genau entgegengesetzt ist. Diese Hypothese mußte sehr gekünstelt und in ihren Konsequenzen für die Mechanik und Newtons Gravitationslehre sehr gewagt erscheinen. Biot vermutete, daß bei einer konsequenten Durchrechnung aller Kräfte auf der Basis des Coulombschen Gesetzes die Franklinsche These falsifiziert werden könnte:

Wenn man das Gesetz des Quadrats der Abstände auf die Hypothese von Cavendish und Aepinus anwenden wollte, würde man wahrscheinlich auf Folgerungen geführt werden, welche den wirklich Statt findenden Verhältnissen der Vertheilung der El. in einem oder zwischen zwei Körpern, die wir gegenwärtig durch die Beobachtung kennen, zuwiderliefen, wodurch dann gleichfalls die Unstatthaftigkeit dieser Hypothese nachgewiesen wäre. Jedoch ist eine solche Herlei-

1) F.U.T. Aepinus, Tentamen theoriae Electricitatis et Magnetismi, Petersburg 1759, 39
Cavendish: Philosophical Transactions 1771; ebenso Wilke, in Fischer 1823, 554

tung noch nicht versucht worden, und scheint auch bei der Verwicklung, welcher die in Rede stehende Hypothese unterliegt, sehr schwer ausführbar. Glücklicherweise hat dies nicht viel auf sich, denn ein weiterer Verfolg der Hypothese könnte im günstigsten Falle nur dahin führen, ihre Übereinstimmung mit den Erscheinungen darzuthun, eine Übereinstimmung, die sich schon bei der jetzt angenommenen Theorie zweier el. Fluida in der größten Schärfe ergibt, und zwar, was ein nicht unwichtiger Umstand ist, mit einer Einfachheit, einer vollendeten Analogie, und unter einer Form, die sie fähig macht, dem Calcul leicht unterworfen werden zu können.

Dem Streit zwischen Unitariern und Dualisten habe ich in dieser Darstellung deswegen einen so breiten Raum gewährt, weil sich hier ganz deutlich zeigt, wie ein Streit zweier gegensätzlicher Annahmen und qualitativer Anschauungsmodelle nicht durch einen eigentlichen Sieg des einen Lagers über das andere ausgeht. Es entsteht im Laufe der Zeit eine Haltung, aus der heraus die Frage nach der Anzahl der Elektrizitäten für die Erklärung der elektrischen Phänomene nur noch minimale Relevanz besitzt. Die eigentliche Frage nach dem Wesen der Elektrizität, die man anfänglich nur auf später verschieben wollte, wird aus den Augen verloren und allmählich als unwichtig beiseite geschoben.

2.12 Chemiker und Kontakttheoretiker: Das Problem der Ursache galvanischer Erscheinungen

Eine weitere Streitfrage, mit der sich der atomistische Theoretisierungsversuch auseinandersetzen mußte, war die Ursache der Elektrizitätserregung in der Voltaschen Säule. In der Hauptsache bildeten sich wiederum zwei Gruppen heraus: die Kontakttheoretiker und

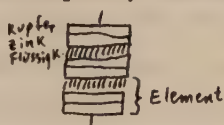
1) Biot 1824/25, II, 197

die Anhänger chemischer Hypothesen.

Durch Voltas Bemühungen war die Theorie von dem physiologischen Ursprung der galvanischen Ströme, wie sie Galvani selbst, sowie besonders Giovanni Aldini und Alexander von Humboldt verteidigt hatten, als irrig erwiesen worden. An ihre Stelle trat die Kontakttheorie. Die Kontakttheoretiker (Volta, v.Marum, C.H.Pfaff, Marianini, Fechner, Poggendorff, Ohm) gingen von der Annahme aus, daß durch die Berührung zweier verschiedener Metalle eine "Impulsionskraft" erzeugt werde, die das elektrische Gleichgewicht stört, so daß das eine der beiden Metalle positiv, das andere negativ elektrisch wird. Die Impulsionskraft bewirkt eine Trennung der beiden Elektrizitäten und erzeugt dadurch eine Spannung. Die Berührung von Metall und Flüssigkeit setzt zwar auch eine Impulsionskraft frei, die jedoch ungleich geringer ist, als die mit zwei Metallen erregte. Der "feuchte Zwischenleiter" in der Voltaschen Säule hat nun einerseits die Funktion, die in den Metallen entstandene Elektrizität weiterzuleiten, aber andererseits zu verhindern, daß durch die Berührung des elektrizitätserregenden Plattenpaares mit einem weiteren Metall die ursprüngliche Impulsionskraft durch eine entgegengesetzte aufgehoben wird. Dem feuchten Zwischenleiter kommt also keine ins Gewicht fallende elektrizitätserregende Wirkung zu, sondern nur eine fortleitende.

Die Wirkungen der Säule konnten nach dieser Theorie durch drei Maßnahmen verändert werden: einmal durch Verwendung von zwei verschiedenen Metallen, die in der Spannungsreihe verschieden weit auseinander liegen, andererseits durch die Veränderung der Leitfähigkeit des feuchten Zwischenleiters, und drittens durch Vergrößerung oder Verkleinerung der Fläche, an denen die Metalle sich gegenseitig berühren oder wo das Metall mit der Flüssigkeit zusammenkommt.

Für die Kontakttheoretiker bestand deshalb eine Wirkungseinheit, also ein Element, der Voltaschen Säule aus den zwei Metallen Kupfer und Zink und dem feuchten Leiter, in dieser Reihenfolge. An den Enden der Säule finden wir immer doppelte Platten, keine einzelnen, wie es viele Anhänger der chemischen Theorie und manche Dynamisten, wie z.B. Pohl propagierten, für die ein Element aus Kupfer, feuchtem Leiter und Zink bestand.



Kontakttheoretisch



chemisch/dynamistisch

Die Anhänger der chemischen Theorie (Ritter, Jäger, Erman, Wollaston, anfangs Davy, Berzelius, Gmelin, Becquerel, de la Rive) sahen in der chemischen Einwirkung der Flüssigkeit auf die beiden Metallplatten keine Folge der Elektrizitätserregung, sondern deren eigentliche Ursache.

1801 zersetzten Nicholson und Carlisle zum ersten Mal Wasser auf elektrolytischem Wege. Im Jahre 1805 er-

schien Ritters "Elektrisches System der Körper", in dem zum ersten Mal behauptet wird, daß die Intensität des galvanischen Stromes ausschließlich von der Stärke der chemischen Aktion abhängt, die in der Einwirkung eines Elektrolyten auf ein Metall erzeugt wird. Schließlich gelang es Davy 1807, Kalium und Natrium auf elektrolytischem Wege zu gewinnen.

Die Voltasche Theorie erfuhr nach ihrer Aufstellung keine bemerkenswerte Weiterentwicklung mehr. Sie war eine Theorie, die einen relativ begrenzten Bereich schlüssig und befriedigend erklärte. Ihrer Fruchtbarkeit, was die Anwendung auf weiterreichende Gebiete, besonders die Chemie, betrifft, waren jedoch enge Grenzen gesetzt. Die Anhänger der Voltaschen Theorie beschränkten sich meist darauf, Einwürfe gegen die Kontakttheorie, die immer häufiger zu hören waren, zu widerlegen und kontakttheoretisch zu erklären.

Im Gegensatz dazu gab es keine "Klassische" chemische Theorie. Fast jeder Anhänger der chemischen Hypothese hatte seine eigene elektrochemische Theorie und die Menge der gesammelten Erfahrungen wuchs ins Unermessliche. In seiner geschichtlichen Darstellung des Galvanismus von 1848 entschuldigt sich Seyffer für die Fehler, die ihm im elektrochemischen Teil unterlaufen sind: "Fehler, die wir mit dem besten Willen nicht verbessern oder umgehen konnten. Wer könnte aber auch in dieses Chaos von Erscheinungen mit einemmal Licht bringen? Bei der Unzahl

von Arbeiten über die Elektrochemie mussten wir, um das Ähnliche aneinanderreihen und zusammenfügen zu können, eine wahre Jagd anstellen, die mit der größten Mühe verknüpft war, so daß unsere Arbeit beinahe daran gescheitert wäre."¹

Die Kontakttheorie hatte sich ihren vergleichsweise hohen theoretischen Stand durch eine Beschränkung des Anwendungsbereiches erkaufte. Die Zersetzung einer Flüssigkeit durch einen durchfließenden Strom wurde anfänglich nicht erklärt und als irrelevant für eine Theorie der Elektrizitätsentstehung abgetan. Später wurde eingeräumt, daß die Zersetzung das Mittel ist, durch welches die Leitung des Stromes und damit seine ununterbrochene Fortdauer ermöglicht wird.²

Aber immer ging die Kontakttheorie davon aus, daß die elektromotorische Kraft einen nicht weiter zu erklärenden und analysierbaren Grundbegriff der Elektrizitätslehre darstellt. Auf die Frage: "Wie ist es zu erklären, daß durch die Berührung von Metallen eine elektrische Kraft zustande kommt?" konnte ein Kontakttheoretiker nichts antworten. Wie die Schwerkraft ist diese elektrische Kraft nicht weiter erklärbar, sondern einfach vorhanden.³

Die Chemiker hingegen wollten einen engen Zusammenhang zwischen den elektrischen Kräften und den chemischen herstellen und damit den Erklärungsbereich vertiefen und erweitern.

1) Seyffer 1848, 411f.

2) So nach Davys späterer Ansicht; vgl. Pfaff 1828, 795

3) Pfaff 1837, 6f. und Gilb. Ann. 10, 1802,

In diesem Sinne war der Wettstreit zwischen den beiden theoretischen Ansichten nur ein scheinbarer. Er ist durch mehrere Faktoren zu erklären: Einmal bestand eine Ungleichzeitigkeit in der inneren Entwicklung der beiden theoretischen Ansätze: die Voltasche^{Theorie} war der chemischen formal überlegen und die Chemie war im Ganzen noch sehr weit in der Baconischen Phase des "bunten Empirismus" - eher eine "systematische Kunst oder Experimentallehre, niemals aber eigentliche Wissenschaft", wie Kant sich ausdrückte.¹

Zweitens war der Anwendungsbereich beider Theorien unterschiedlich groß: die Kontakttheoretiker wollten nur die Ursache und Wirkung der galvanischen Elektrizität erklären, während die Chemiker auch diejenigen chemischen Erscheinungen elektrisch erklären wollten, welche prima facie ohne begleitende elektrische Phänomene ablaufen.

Und schließlich drittens wurden die Anwendungsbereiche als verschieden strukturiert aufgefaßt: die Voltasche Theorie war eine Makrotheorie der physikalischen Erscheinungen an der Voltaschen Säule, während die chemischen Theorien nach der Ursache der in der Säule entstehenden Kraft fragten und eine Mikrotheorie darüber aufstellten.²

2.13 Das Problem der Wirkung: Erklärung der Elektrizitätsleitung

In diesem Abschnitt soll anhand einiger weniger, aber wie ich meine, typischer Beispiele näher gezeigt werden, wie sich im Frühstadium der Elektrizitätslehre allmählich Begriffe über die Elektrizitätsleitung heraus-

1) Kant 1795, VIII, A X, S. 15

2) Vgl. Ostwald 1896, 426ff

bildeten. In der Baconischen Phase ergeben sich recht wenig Erfahrungen, die theoretische Erwägungen und Begriffe notwendig machen. In den Zeitschriften findet man Berichte, daß die Wirkung eines neu konstruierten Apparats alle früheren Apparate übertrifft oder daß sich eine ganz neue, bisher ungekannte Wirkung gezeigt habe. Erst allmählich entsteht das Bedürfnis, Wirkungen zu klassifizieren und die Umstände herauszufinden, nach denen sie variiert werden können.

2.131 van Marum und Pfaff

Ein gutes Beispiel hierfür sind die Versuche von C.H.Pfaff und M. van Marum, die 1801 daran gingen, die Identität von "Elektrizität" und "Galvanismus" nachzuweisen.¹ Das war eines der wenigen Probleme dieser Zeit, das eine vergleichsweise quantitative oder doch komparative Messung von der Sache her notwendig machte. In einem ersten Versuch berühren Pfaff und Marum verschieden große Batterien von (wahrscheinlich parallel geschalteten) Leydener Flaschen mit der Voltaschen Säule und stellen fest, daß schon eine kurze Berührung genügt, um eine solche Batterie auf dieselbe "Spannung" wie die Säule zu "laden". Die Spannung der geerdeten Säule wird mittels eines Elektroskops gemessen, d.h. die Kraft, mit der sich zwei gleichnamig geladene Körper abstoßen, wird zum Maß genommen. Dabei ist es wichtig, sich klar zu machen, daß die Spannung hier nur immer an einem Punkt, genauer:

1) Schreiben des Herrn Dr. Martinus van Marum an Herrn Alex. Volta, Professor zu Pavia, über die Versuche mit der electrischen Säule, welche er und der Prof. Pfaff in dem Teylerschen Laboratorium zu Harlem im Nov. 1801 angestellt haben = Gilb. Ann. 10, 1802, 121-160

am positiven oder negativen Ende der ungeschlossenen Batterie oder Säule gemessen wurde. Auf Grund der Gesetze der Elektrostatik ergibt sich am entgegengesetzten Ende der gleiche Betrag an Spannung unter entgegengesetztem Vorzeichen und braucht deswegen nicht eigens gemessen zu werden. Statt "Spannung" werden bis Ohm auch die Begriffe "Intensität" und "Tension" und "elektromotorische Kraft" im gleichen Sinne verwendet.

Pfaff und Marum finden weiter heraus, daß bei der Voltaschen Säule im Vergleich zu statischen Elektrizitätsträgern nur schwache Anziehungs- und Abstoßungserscheinungen vorkommen, daß die Schlagweite der Entladungsfunken, die man durch mit den Polen verbundene Drähte erreichen kann, ziemlich klein ist, und schließlich, daß unvollkommene Leiter der Elektrizität der Voltaschen Säule einen größeren Widerstand entgegensetzen. Aus diesen Beobachtungen wird gefolgert, daß die Voltasche Säule von geringerer Intensität sei als eine herkömmliche Elektrisiermaschine oder Leydener Flasche. Außerdem wird festgestellt, daß die Intensität der Säule in gleichem Maße wie die Anzahl der Plattenpaare wächst.

Von der Intensität der Säule wird die "Menge" oder "Quantität" der Elektrizität unterschieden. Pfaff und van Marum messen sie, indem sie Leydener Flaschen durch kurze Berührung mit der geerdeten Säule aufladen. Die Ladungsmenge der größten Batterie, die auf diese Weise gerade noch dieselbe Spannung wie die Säule erhält,

entspricht also genau der Elektrizitätsmenge der Säule. Und diese Menge ihrerseits entspricht, wie man findet, der Größe der Belegung einer Flasche bzw. der Plattengröße einer Säule. Ein Vergleich mit der Elektrisiermaschine wird von Pfaff und Marum ebenfalls hergestellt. Man zählt, wie oft eine Batterie mit einer konstant gedrehten Elektrisiermaschine kurz berührt werden muß, um diese Batterie bis zu der Intensität aufzuladen, die sie durch eine einmalige kurze Berührung mit der Volta-Säule erhalten würde. Das Ergebnis sieht so aus, daß eine Volta-Säule mit 200 Plattenpaaren viel mehr elektrisches Fluidum hergibt, als die beste damals bekannte Elektrisiermaschine, die Maschine des Teylerschen Museums in Harlem.

Marum und Pfaff führen nun einen weiteren Begriff ein, den der "Geschwindigkeit" des elektrischen Stromes. Sie nehmen an, daß sie in einer geschlossenen Kette (= Stromkreis) konstant bleibt. Da sie sich, wie Experimente mit statischer Elektrizität ergeben haben, nicht direkt messen läßt, greift man zu einer Größe, die von der Geschwindigkeit des Stromes direkt abhängig ist, nämlich der Menge, die der Strom pro Zeit durch den Draht hindurchführt. Unter der Leitungsfähigkeit eines Drahtes versteht man dann die Toleranzgrenzen des Stromes, die er durchläßt.

Pfaff zieht aus diesen Experimenten den Schluß, daß man die Säule leicht mit einer Leydener Flasche vergleichen kann, die sich in einem Augenblick entlädt und wieder auflädt:

Auch ist bei der Vergleichung einer Voltaischen Säule mit einer Batterie von unendlicher Capacität, die aber nur bis auf eine geringe Tension geladen ist, noch zu bemerken, daß die Voltaische Säule die Effecte der Ladung einer solchen Batterie, (in Hervorbringung von Erschütterungen u.s.w.,) nur durch die Totalsumme vieler unendlich schnell auf einander folgender schwacher Ladungen und Entladungen hervorbringt. Sie ist gleichsam eine kleine Leidener Flasche, die sich aber in einem Zeitaugenblicke so unendlich oft ladet und wieder entladet, daß sich in gleicher Zeit eben so viel Electricität aus ihr ergießt, als aus einer Batterie von unendlicher Capacität, deren Entladung, d.h., das Einstromen und Durchströmen ihres Electricitätsvorraths in und durch einen Ableiter, z.B. durch den menschlichen Körper, ebenfalls nicht in einem metaphysischen Zeitaugenblicke, sondern bloß in der Succession unendlich vieler kleiner Zeittheilchen geschehen, und folglich in der Hinsicht mit der Succession unendlich vieler Entladungen einer kleinen Leidener Flasche sehr wohl verglichen werden kann.

Mit diesen und ähnlichen Experimenten glaubte man, die Einwürfe gegen die Identitätsthese von Galvanismus und Elektrizität entkräftet zu haben. Daß einige Erscheinungen, die bei Experimenten mit Flaschen und Maschinen beobachtet wurden, nun bei der Galvanischen Säule mangelhaft oder garnicht auftreten, kann nun mit der geringen Spannung der Säule erklärt werden. Das war besonders wichtig in Bezug auf die Leitfähigkeit. Man hatte nämlich herausgefunden, daß manche Stoffe das "elektrische Fluidum" durch sich hindurch lassen, nicht jedoch das "galvanische Fluidum". Durch Erhöhung der Intensität der Säule durch Hinzufügung weiterer Plattenpaare, konnte man in solchen und ähnlichen Fällen ebenfalls galvanische Elektrizität durchleiten. Daß wiederum andere Erscheinungen vielfach verstärkt auftreten, wird auf die größere Elektrizitätsmenge der Säule zurückgeführt.² Als dann

1) Gilb. Ann. 10, 1802, 231 Ähnliche Argumentationen findet man bei Biot 1824/5, II, 293, 326f., Muncke 1829, 788. Pfaff 1828, 651, 817, 954.

2) Pfaff 1828, 771f.

Marum 1803 noch nachweist, daß man auch mit Hilfe der Elektrisiermaschine Flüssigkeiten zersetzen kann, ist die letzte Eigenschaft, die man ausschließlich dem galvanischen Fluidum zuschrieb, auch für das elektrische Fluidum nachgewiesen.¹

Mit diesen Begriffen und ähnlichen Versuchen ist bis 1820 der Rahmen abgesteckt für die Probleme, die formuliert und die Versuche, die zu ihrer Lösung durchgeführt werden. Man geht daran, die verschiedensten Wirkungen der Elektrizität, die man durch alte und neue Apparate fand, mit Hilfe der Begriffe: Intensität, Quantität, Leitfähigkeit und Geschwindigkeit zu erklären.

Zum Messen der Intensität des galvanischen Stromes wurde normalerweise das Elektrometer herangezogen, vereinzelt aber auch noch galvanische Froschpräparate verwendet. Man verband einen Pol der Säule mit dem geerdeten Instrument und maß den Ausschlag der sich abstoßenden Goldblättchen. Man fand, daß die Intensität mit der Anzahl der Plattenpaare anwächst, allerdings nur bis zu einer gewissen Grenze.²

Die Quantität des galvanischen Stromes in der Säule wurde erstmals 1800 von Robertson nach der Menge des durch die Säule zersetzten Wassers beurteilt; Gay-Lussac und Thenard nehmen 1809 die Menge des bei der Elektrolyse von Wasser entstehenden Gases als Maß für die Menge des

2) Zur Intensitätsmessung vgl. z.B.: Pfaff 1824, 70; Muncke 1829, 789; Pfaff 1827, 670; Singer 1814, 333; Biot 1824/5, III, 222; Seyffer 1848, 277.

1) Gilb. Ann. 11, 1803, 21

Stromes. Für viele Versuche genügte es vielen Forschern auch, nur die physiologische Wirkung auf den eigenen Körper zum Maß der Quantität herzunehmen. Ein weiteres Maß stellte die Wärmewirkung dar, die eine Säule auf einen sie schließenden Draht ausübt, bzw. die Länge eines Drahtes bei bestimmter Dicke, bei der der Draht glüht oder schmilzt. Die Größe der Oberfläche der Platten in der Säule wurde direkt proportional zur Quantität gefunden.¹

Es zeigt sich hier deutlich, daß die Erklärung der Voltaschen Batterie direkt von der Erklärung der Leydener Flasche abgeleitet ist. Je größer die Flasche, desto größer die Menge an Elektrizität, die darin gespeichert werden kann; ergo: je größer die Platten in der Säule, desto größer auch hier die Menge. Und je mehr geladene Flaschen man hintereinander schaltet - je mehr Plattenpaare eine Batterie hat - desto größer die Intensität des Stromes.

Die Entdeckung des Elektromagnetismus 1820 und die Erfindung des Multiplikators (wie man das Galvanometer damals nannte) gaben den Forschern das neue Problem auf, die magnetische Wirkung des Stromes mit den alten Begriffen zu erklären. Das Interesse war dadurch in verstärktem Maße auf den durch den Draht geschlossenen galvanischen Stromkreis gerichtet. Auch hier wurde die Erklärung der Aktionen im geschlossenen Stromkreis dem elektrostatischen

1) Zur Messung der Quantität vgl. z.B.: Albrecht 1885,144; Biot 1824/25, II 318ff., III 222; Muncke 1829,800,811; Pfaff 1824,69; Pfaff 1828,955f.; Singer 1814,414; Fischer 1825,246.

Vorbild angepaßt.

Für die Messung der Elektrizitätsmenge einer galvanischen Säule nahm man jetzt fast nur noch den Multiplikator zu Hilfe.¹ Nun ist es aber so, daß man die Elektrizitätsmenge, die der galvanische Strom pro Zeiteinheit transportiert, als abhängig von der Leitfähigkeit der (nicht elektrizitätserregenden) einzelnen Teile des Stromkreises annahm. Je weniger der Strom in seinem Durchgang durch den flüssigen Leiter und den Schließungsdraht "retardiert" wird, desto größer ist die Menge an Elektrizität, die pro Zeit durchfließt. (das gilt nur für die Kontakttheoretiker. Für die Chemiker ist die Leitfähigkeit allein des Schließungsdrahtes relevant.)

Aber auch die Intensität der Säule ist wichtig für die Quantität und damit für die Leitfähigkeit, obwohl keine direkte proportionale Abhängigkeit konstatiert wird. Um das näher zu erläutern, sei Coulombs Erklärung eines Versuchs aus der Elektrostatik näher beschrieben.

2.132 Coulomb

In der dritten "Abhandlung über die Elektrizität und den Magnetismus"(1785) beschreibt Coulomb, wie er den Elektrizitätsverlust mißt, den eine an einem idioelektrischen Träger, d.h. Isolator, aufgehängte, elektrisch geladene Metallkugel erleidet. Er kommt zu dem Ergebnis, daß dieser Elektrizitätsverlust (*décroissement de l'électricité*) von verschiedenen Faktoren abhängt:

1) Biot 1824/25, III, 222; Muncke 1827, 482, 495; Pogg. Ann. 8, 1826, 347

von der Elektrizitätsdichte (=Intensität) auf der Kugel, sowie der Dimension und dem Material des isolierenden Fadens, an dem die Kugel hängt, wenn man die Abgabe ans umgebende Medium vernachlässigen kann. Je schlechter ein Leiter und je länger etc. die Stützen, desto größer muß die Intensität der Elektrizität sein, damit überhaupt ein Elektrizitätsfluß längs des Fadens zustande kommt.

Coulomb vergleicht den Widerstand, den der Draht der Ausbreitung der Elektrizität entgegensetzt, mit einem mechanischen Verschiebungswiderstand, d.h. dem Reibungswiderstand. Der Ladungsabfluß wird analog zu der Schieb- oder Ziehbewegung eines Körpers auf einer Ebene gesehen. Coulomb war 12 Jahre lang Bauingenieur und mußte einen Festungsbau leiten, der große Erdbewegungen notwendig machte.¹ Die Erfahrungen dieser Zeit erregten Coulombs theoretisches Interesse und er stellte 1781 das ebenfalls nach ihm benannte Reibungsgesetz auf, das die Reibungskraft R analog zur Normalkraft N setzt. Wenn ein Körper auf einer ebenen Unterlage geschoben oder gezogen wird mit einer konstanten Kraft K und eine Reibung R dabei auftritt, so ergibt sich für die resultierende Kraft $K^+ = K - R$, falls $K > R$; sonst ist $K^+ = 0$. Wenn man für R das Coulombsche Reibungsgesetz anwendet, ergibt sich:

$$K^+ = K - \mu \cdot N$$

wobei μ ein von der Oberflächenbeschaffenheit abhängiger

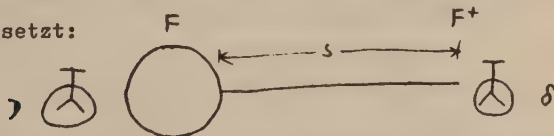
1) Vgl. Gillmor 1971

Koeffizient ist.

Diese Sachverhalte überträgt Coulomb 1785 analog auf die Entladung elektrisch geladener Kugeln längs unvollkommener Leiter. Bei diesem Vorgang, so schreibt Coulomb, wird sich das elektrische Fluidum

in der Weise verbreiten, daß die Abstoßung des Fluidums in allen Punkten genau im Gleichgewicht steht mit dem Maximum des Widerstandes, den die Coercitivkraft des idioelektrischen Trägers dem Abfluß dieses Fluidums entgegenstellen kann. Aber es ist wohl zu bemerken, daß, da dieses Widerstandsmaximum keine active, sondern eine coercitive Kraft ist, die man mit dem Widerstande einer Reibung vergleichen kann, jede abstoßende Wirkung des elektrischen Fluidums, die kleiner als das Maximum dieses Widerstandes ist, den Stabilitätzustand dieses nach irgend einem Gesetze längs des Leiters ausgebreiteten Fluidums nicht stören wird.¹

Bei der Ermittlung dieses Gesetzes wird die Kraft F , mit der die Ladung D der Kugel und die nach Anbringung eines idioelektrischen Trägers an dessen Ende entstehende Ladung δ aufeinander wirken, bestimmt und mit K analog gesetzt:



Die Normalkraft N des mechanischen Reibungswiderstandes wird analog gesetzt der Widerstandskraft B , die eine Längeneinheit des Drahtes ausübt, dessen Querschnitt vernachlässigbar klein ist. Der Gesamtwiderstand beträgt also Länge mal "Normalwiderstand" B des in Frage stehenden Materials. Die resultierende Kraft, d.h. $F - B \cdot s$ entspricht der Kraft F^+ , den die Ladung der unmittelbaren Umgebung des Leiterendes auf die Ladung δ dieses

1) Coulomb 1785,635f. = 1890,66

Drahtendes ausübt:

$$F^+ = F - B \cdot s$$

falls $F > B \cdot s$; sonst $F^+ = 0$. Die Analogie zum Reibungsgesetz ist damit gefunden. Wir sehen auch, daß die Möglichkeit für einen vollkommenen Leiter hier noch eingeräumt wird: wenn $B = 0$ ist, dann ist der Widerstand $= 0$ und die Kraft, die auf der Kugeloberfläche wirkt, ist im Abstand s im Leiter immer noch genauso groß und hat keine Abschwächung erfahren.

In der Umformung von F als $\frac{D\delta}{s^2}$ (bzw. $\frac{D\delta}{(s+r)^2}$ mit r als Kugelradius) und F^+ als $\frac{\delta \cdot d \delta}{ds}$ nach dem elektrostatischen Gesetz von Coulomb glaubt Coulomb F vernachlässigen zu können. In einer etwas undurchsichtigen mathematischen Ableitung¹ gelangt er zu einer neuen Formel

$$\delta^2 = D^2 - B \cdot s$$

woraus er den Schluß zieht:

Also verhalten sich die Längen verschiedener Seidenfäden oder irgend welcher unvollkommen ideoelektrischer Träger wie die Quadrate der Dichtigkeiten, sobald sie anfangen vollkommen zu isolieren, so wie wir es experimentell gefunden hatten.²

Durch dieses Ergebnis wird Coulomb zu einer Erklärung der Mikrostruktur eines Elektrizitätsleiters, sei er ein perfekter oder unvollkommener Leiter, geführt: Ein Leiter besteht aus Molekülen, die dem elektrischen Strom überhaupt keinen Widerstand entgegensetzen, und aus Molekülen, die vollkommene Nichtleiter sind. In den Molekülen der ersten Art sammelt sich Elektrizität über eine gewisse Zeit hinweg an, bis eine gewisse Dichte erreicht ist, die groß genug ist, das nichtleitende Molekül in einer Entladung zu überbrücken.

1) vgl. Coulomb 1890, Nachwort des Hrsg. 2) Coulomb 1890, 68

(Man wußte aus vielen Versuchen, daß man eine genügend stark geladene Flasche auch durch trockene Luft, Glas und andere Isolatoren entladen kann.) In Coulombs eigenen Worten:

Was das Experiment uns hier lehrt, steht mit der Theorie im Einklang, wenn man annimmt, wie wir es in unsern beiden ersten Abhandlungen bewiesen haben, daß die Wirkung des elektrischen Fluidums dem umgekehrten Verhältnisse des Quadrats der Entfernungen folgt, und daß die Unvollkommenheit der Idioelektrizität (*l'imperfection de l'idioélectricité*) der Körper von der idioelektrischen Entfernung abhängt, in der sich die leitenden Moleküle befinden, welche einen Bestandteil des unvollkommenen idioelektrischen Trägers ausmachen, oder längs seiner Oberfläche ausgebreitet sind; daß folglich das elektrische Fluidum, um von einem leitenden Molekül zum andern zu gelangen, einen kleinen idioelektrischen Raum überschreiten muß, der größer oder kleiner ist, je nach der Natur des Körpers; und daß dieser zu überschreitende Raum einen für denselben Körper konstanten Widerstand darbietet (*que cet espace à traverser oppose une résistance constante pour le même corps*), weil diese leitenden Moleküle gleichförmig oder in gleichem Abstand von einander verteilt sind.

Diese Verhältnisse wurden nun analog auf den geschlossenen galvanischen Stromkreis übertragen. Wenn die einzelnen Teile des Stromkreises, denen eine nur weiterleitende und keine elektrizitätserregende Funktion zugemessen wurde, schlecht leiten oder sehr lang sind, kann es möglich sein, daß trotz großer Elektrizitätsmenge, über die die Säule verfügen könnte, keine oder nur eine geringe Strömung zustande kommt. Umgekehrt kann die Quantität der Säule unter Umständen vergrößert werden, indem man die Leitungsfähigkeit des feuchten Zwischenleiters vergrößert, wie der Kontakttheoretiker sagt, bzw. indem man die chemische Aktivität in der Säule

1) Coulomb 1785, 633 = 1890, 62f. Vgl. auch Grens Neues Journal 3, 1796, 50-80, und Biot 1824/5, II, 159ff.
2) *ibid.*

verstärkt, wie sich der Chemiker ausdrücken würde. Auf diese Weise hängt die Quantität des Stromes auch von der Intensität der Säule ab: Eine Säule, die noch so viel Quantität besitzt, aber nicht genügend Intensität, um alle Widerstände zu überwinden, wird keinen Stromfluß zustande bringen.

Nach dieser Theorie wird es nun auch möglich, die Leitfähigkeit von Stoffen direkt mit Hilfe des Multiplikators zu messen. Man kann die Längen verschiedener Drähte mit konstantem Querschnitt, bei denen ein gegebener Multiplikator keinen Ausschlag mehr zeigt, ganz analog zu Coulombs Versuch, als das Maß hernehmen für die Leitungsfähigkeit dieser Drähte. Es genügt aber auch, einen beliebigen festen Multiplikatorausschlag als das Maß herzunehmen, bezüglich dessen Drähte verschiedenen Materials variabler Länge miteinander verglichen werden. Nach dieser Theorie kann man jedoch auf keinen Fall von verschiedenen Längen und/oder verschiedenen Querschnitten eines gegebenen Drahtes und den daraus erhaltenen Multiplikatorausschlägen auf die Abhängigkeit beliebiger Drähte von ihren Dimensionen schließen. Was man erhält ist nur die Abhängigkeit von der Dimension eines Drahtes von ganz bestimmtem Material und bei ganz bestimmter Intensität der Voltaschen Säule. Die Multiplikatorausschläge, die man für solch einen Draht bestimmten Materials bei bestimmter Intensität und variabler Dimension findet, können nach dieser Auffassung von

Material zu Material und von Intensität zu Intensität erheblichen Unterschieden unterliegen.

Dies ist ein Einwand, den Schweigger¹ gegen die Experimente von Barlow² vorgebracht hat und der auch für die Einschätzung des Ohmschen Gesetzes später von Wichtigkeit wurde. Barlow vergleicht die verschiedenen Abweichungen der Magnetnadel eines Multiplikators, wenn er einen 838 Fuß langen Draht sukzessive um 40 Fuß kürzer werden läßt. Als Resultat findet er, daß das Leitungsvermögen sich umgekehrt wie die Quadratwurzeln der Länge des Drahtes bei konstantem Querschnitt verhält. Da aber die Intensität der gebrauchten Stromquelle abnimmt (wie bei allen damals verfügbaren galvanischen Säulen), muß vor jedem Versuch durch einen kleinen Stromkreis die Stärke der Batterie getestet werden. "Um aber seine Beobachtungen auf eine constante Kraft der Elektrizität zu reducirn", schreibt Schweigger, "nimmt Barlow an, daß für schwächere und stärkere Elektrizität dasselbe Leitungsgesetz gelte (worin eben der Fehler liegt, auf welchen ich schon S.119 des vorliegenden Bandes aufmerksam gemacht) und reducirt unter dieser Voraussetzung alle seine Beobachtungen auf die Kraft von 21^0 , d.h. auf die Stärke von Elektrizität, welche 21^0 Abweichung der Magnetnadel bei Schließung im kleinen Kreis bewirkte."

Auf der von Schweigger erwähnten Seite 119 findet sich der Hinweis, daß die Thermoelektrizität von einer gewissen geringen Intensität mit größerer Leichtigkeit

1) Schweigg.Journ. 44, 1825, 362

2) Edinburgh Philosophical Journal 12, 1825, 105-114

"ohne alle wahrnehmbare Verminderung der Kraft" durch sehr lange Drähte hindurchgeht, "während bei einem starken Strome diese Kraftverminderung bald wahrnehmbar ist." Daraus zieht er den folgenden Schluß: "Daher ist der elektro-magnetische Multiplicator bloß bei einem schwachen hydro-elektrischen Strom brauchbar, bei etwas stärkerem gewährt er keine bedeutende Kraftvermehrung".¹

Auch Gustav Theodor Fechner hat sich noch 1828 diesem Einwand angeschlossen, im Zusammenhang mit einer Diskussion eines Versuches von De la Rive:

Jedenfalls scheint sie in einem Bezüge zu der, schon längst vom Prof. Schweigger erwiesenen, viel allgemeineren Thatsache zu stehen, daß der Widerstand, den der Strom in der Kette findet, in irgend einem Verhältnisse zur Stärke des Stromes selbst steht, und daß Verschlechterung eines Leiters verhältnißmäßig weit wirksamer ist zur Schwächung eines starken, als eines schwachen Stroms.

De la Rive verspricht in einer andern Abhandlung den Einfluß zu erörtern, den das von ihrer Substanz abhängig eigenthümliche Leitungsvermögen der Flüssigkeiten auf die Stärke des Stroms hat. Es ist sehr zu wünschen, daß wir durch ihn wirklich den versprochenen Aufschluß erhalten, da dieser Gegenstand in der That jetzt in ein völliges Dunkel zurückgetreten ist.²

Dieses Zitat ist umso bemerkenswerter als Fechner wie kein anderer Wissenschaftler der Zeit sich für die Annahme des Ohmschen Gesetzes (1826) verwendet hat.

2.133 Davy

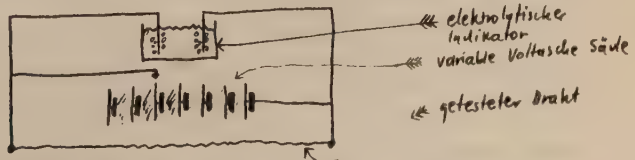
Eine weitere Methode zur Messung der Leitfähigkeit verschiedener Stoffe soll kurz angeführt werden, da sie von

1) Schweigg.Journ. 44, 1825,

2) Schweigg.Journ. 53, 1828, 428

allen Versuchen zur Leitfähigkeit vor Ohm am meisten Anerkennung geerntet hat und am häufigsten zitiert wurde.¹ Humphry Davy, von dem dieses Experiment stammt, versucht den elektrostatischen Begriff der "vollständigen Entladung" auf den geschlossenen galvanischen Stromkreis zu übertragen. Wir erinnern uns, daß für Coulomb der Elektrizitätsverlust einer Kugel nur ab einer bestimmten Elektrizitätsdichte und unter einer bestimmten maximalen Dimension des Trägers zustande kommen kann. Ein ähnlicher Versuch stammt von Priestley, der schon sehr früh die Leitfähigkeit von Stoffen dadurch testet, daß er einen elektrischen Schlag mit der Leydener Flasche durch einen Stoff bekannter Dimension hindurchschickt und anschließend die Flasche mit dem Elektroskop prüft, wie groß in ihr der Rückstand an Elektrizität ist.²

Davy wendet diese Idee auf den galvanischen Stromkreis an, indem er einen elektrolytischen Indikator parallel zu einem Stromkreis schaltet. Dieser Stromkreis besteht aus einem variablen Testdraht und einer Stromquelle, die (idealiter) von konstanter Intensität ist, deren Elektrizitätsmenge jedoch variiert werden kann.



Experimentanordnung des Versuchs von Davy

-
- 1) z.B. Biot 1824/5, II, 343; Fischer 1823, 146; 1825, 677ff. Singer 1819, 413; Pfaff 1827, 292; 1831, 136, 144, 151, 165, 173; Pfaff 1824, 87ff.; Muncke 1827, 496; 1829, 737, 783.
 - 2) Pfaff 1831, 171 = Priestley 1772, 398

Er untersucht nun (für eine konstante Elektrizitätsmenge), bei welcher Drahtlänge verschiedener Stoffe von sonst gleicher Dimension die Gasentbindung im elektrolytischen Indikator aufzuhören beginnt. In diesem Moment nämlich, so schließt Davy, geht die ganze Elektrizitätsmenge der Säule durch den Testdraht und es bleibt keine Elektrizität übrig, die eine Gasentbindung bewerkstelligen könnte. Auf diese Weise erhält er eine quantitative Ordnung für die Leitfähigkeit verschiedener Stoffe. Um die Abhängigkeit der Länge und des Querschnitts ein und desselben Drahts festzustellen, werden verschieden lange oder dicke Drähte in den Stromkreis gebracht und die Elektrizitätsmenge der Stromquelle verändert. Er findet, daß je kürzer und dicker der Draht, er umso mehr Elektrizitätsmenge völlig entladen kann.

Der Rückstand an Elektrizität, welcher bei unvollständiger Entladung der Säule im Indikator eine Gasentbindung erzeugt, ist ein Zeichen für die sogenannte "freie" Elektrizität", die von der "strömenden Elektrizität" unterschieden werden muß. Angenommen, man hat eine Säule, die an dem einen Pol einen gewissen Elektrometerausschlag zeigt, während der andere geerdet ist. Schließt man jedoch die Säule mit einem gut leitenden Draht, so verschwindet der elektroskopische Ausschlag, d.h. die mit dem Elektrometer zuvor gemessene freie Elektrizität ist verschwunden, und damit die Spannung!

Dahinter steckt folgende Vorstellung: Ein Elektro-

meterausschlag an der offenen Säule zeigt, daß die beiden Elektrizitäten in der Säule getrennt vorhanden sind (bzw. nach der unitarischen Theorie: daß an einem Pol der Säule ein Überfluß, am andern ein Mangel vorhanden ist). Wird nun die Säule geschlossen, dann binden sich beide Elektrizitäten aneinander (bzw. Mangel und Überfluß an Elektrizität gleichen sich aus). Strömung von Elektrizität heißt also wesentlich: Ausgleichung!

Alle elektrische Thätigkeit, die in der geschlossenen Kette etwa statt finden möchte und auf deren unleugbares Daseyn wir aus anderweitigen Erfahrungen schließen, ist also gleichsam auf diese selbst eingeschränkt, geht nicht über ihre Grenzen hinaus, und kann also nicht in der Anhäufung der einen oder andern Art von E. und der damit gegebenen Spannung, die nach Ausgleichung strebt, sondern nur in dieser Ausgleichung selbst bestehen.¹

Nach den Gesetzen der Elektrostatik ist klar, daß jede Ausgleichung von Elektrizität(en) mit dem Verschwinden des Elektrometerausschlags Hand in Hand geht:

Werden die beiden Pole der Säule durch einen Metalldraht mit einander verbunden, so ist die Säule im Zustande der vollkommenen Schließung und zeigt weiter keine Spur von freier, mit Spannung begabter E. nach außen, und auch durch die besten Condensatoren läßt sich durch das in Nr. 71 angegebene Verfahren keine Spur von Ladung erhalten.²

Wenn jedoch in einem geschlossenen galvanischen Stromkreis trotzdem ein elektroskopischer Ausschlag an den Polen beobachtet werden kann (bei unvollkommenen Schließungsleitern), so kann das nur heißen, daß lediglich ein Teil der Elektrizität zum Strömen kommt (d.h. die Spannung ausgleicht), ein anderer Teil aber im Schließungsleiter als "freie Elektrizität" zurück-

1) Pfaff 1828, 689. Vgl. zu diesem Thema auch Schagrín 1963
2) Pfaff 1828, 851; vgl. auch Gilbert in Gilb. Ann. 66, 1820, 342; Brandes 1830, 347

bleibt. Diese freie Elektrizität ist statisch und verteilt sich im Draht entsprechend dem d.h. sie ist an den Polen dichter gelagert als in der Mitte des Schließungsdrahtes.

Dieser Sachverhalt wurde erstmals von Erman und Ritter festgestellt. Erman schloß eine Säule mit einer nassen Hanfschnur und stellt fest, daß der Ausschlag eines Elektroskops, das man mit der nassen Hanfschnur in Verbindung bringt, an den Polen am stärksten ist und zur Mitte zu linear auf Null abfällt.¹ Fechner hat das wie folgt kommentiert und beschrieben:

In allen Fällen, wo die unvollkommen geschlossene Säule freie Elektrizität an ihren Polen zeigt, bemerkt man, daß diese Elektrizität sich von jedem Pole auf eine gewisse Strecke mit abnehmender Stärke in den unvollkommen schließenden feuchten Leiter hineinerstreckt, der solchergestalt um die Mitte einen Indifferenzzustand zeigt. Man muß sich auch hier wohl hüten, diese freie Elektrizität, die mit der freien Elektrizität der Pole selbst gleichen Ursprung hat, mit derjenigen gleich zu achten, welche die Erscheinungen der Strömungen bewirkt; da diese für das Elektrometer wegen ihrer in jedem Augenblick erfolgenden Neutralisation gänzlich verschwindet, und in der That werden wir später durch unzweideutige Thatsachen nachweisen, daß die Wirkungen der strömenden Elektrizität von der für das Elektrometer wahrnehmbaren freien Elektrizität gänzlich unabhängig erfolgen.²

Und Pfaff:

Je geringer die Leitungsfähigkeit des flüssigen Leiters ist, welcher die beiden Pole der Säule mit einander verbindet, um so mehr kommt die freie el. Spannung derjenigen nahe, welche sie im vollkommen isolirten und ganz offenen Zustande der Säule zeigen, je größer diese Leitungsfähigkeit ist, um so mehr sinkt diese Divergenz.³

-
- 1) Gilb. Ann. 8, 1801, 197 und 10, 1802, 1ff. Ritter: Gilb. Ann. 8, 1801, 455; Jäger: Gilb. Ann. 13, 1803, 411; Prechtl: Gilb. Ann. 25, 1807, 88; Configliachi: Gehlens Journ. 8, 344; Biot 1824/5, II, 308f.
 - 2) Fechner 1829, 71
 - 3) Pfaff 1828, 848

Ritter und Erman interpretierten dieses Phänomen innerhalb ihrer naturphilosophischen Theorien. Sie sprachen davon, daß an jedem Punkte des durchflossenen Leiters der ganze bipolare Gegensatz vorhanden sei "mit einer Spannung, wie sie bei zwei einander so nahe gerückten und sich so kräftig anziehenden Wesen, die doch immerfort getrennt bleiben müssen, zu erwarten ist".¹ Auch Oersted vertrat eine ähnliche Auffassung.²

Erman war es, der sich überlegte, ob man die freie Elektrizität auch unsymmetrisch in einem schlecht schließenden Leiter verteilen könne. Er entdeckte, daß gewisse Stoffe nur für eine Art von Elektrizität, positive oder negative, durchlässig sind und gibt ihnen den Namen: "unipolare Leiter". 1807 bekommt er für diesen Nachweis den von Napoleon gestifteten Galvanischen Preis des Institut National in Paris. Seine Theorie war lange Zeit ganz unangefochten und wurde für sehr wichtig angesehen. Die meisten Atomisten der Zeit sahen in Ermans Versuchen auch einen schlagenden Beweis für die These, daß es zwei elektrische Flüssigkeiten und nicht bloß eine gebe.

Erman teilte alle Stoffe bezüglich ihrer Leitfähigkeit in fünf Klassen ein: die Nichtleiter, die vollkommenen Leiter, die bipolaren Leiter, die positiv unipolaren Leiter (z.B. Kerzenflammen), die negativ unipolaren (z.B. Seife und Eiweiß). Bipolare Leiter sind solche unvollkommenen Leiter, an denen eine symmetrische Vertei-

1) Gilb. Ann. 67, 1821, 408

2) Zu Oersteds Naturphilosophie vgl. Stauffer 1957

lung freier Elektrizität an beiden Polen feststellen ist; die unipolaren Leiter leiten nur eine Art von Elektrizität und isolieren die andere. Vollkommene Leiter hingegen erlauben keine Feststellung einer statischen Elektrizität.

Als wichtigstes Ergebnis dieses Abschnitts können wir festhalten: Die Theorie des geschlossenen galvanischen Stromkreises war eng an elektrostatischen Vorbildern orientiert. Die Leitfähigkeit wurde als abhängig von der Intensität der ungeschlossenen Säule angesehen¹: nur wenn die Säule genügend stark geladen ist, kommt überhaupt Stromfluß zustande. Die Leitfähigkeit eines Stoffes (bei bestimmter Intensität) wird direkt mit dem Multiplikator gemessen. Seit Barlow und Davy ist bekannt, daß die Leitfähigkeit eines Drahtes von seiner Länge umgekehrt und seinem Querschnitt direkt proportional abhängig ist. Im Leiter, der die Voltasche Säule schließt, wird die statische freie Elektrizität von der fließenden gebundenen unterschieden.

1) Außer dem schon genannten siehe: Colladon: Pogg. Ann. 6, 1826, 548; Fourier & Cérsted: Schweigg. Journ. 41, 1824, 48-65 und Fischer 1825, 657

2.2 Das "System des Dynamismus"

Wie wir schon bemerkten, gab es neben dem atomistischen Theoretisierungsbestreben auch ein dynamistisches.

Im Grunde leitet sich diese Vorstellung von Kants "Metaphysischen Anfangsgründen der Naturwissenschaft" (1786) her, in denen Kant versucht hat zu zeigen, daß die Existenz der Materie durch zwei Kräfte, die "Anziehungskraft" und "Zurückstoßungskraft", bedingt ist.¹ Das spätere System Schellings², und auch Hegels und Fichtes, denen der Dynamismus einiges verdankt, hat dann einerseits zum Ziel, dieses Kantische Programm auf die ganze Wirklichkeit auszudehnen; andererseits wird aber der nüchterne Kantische Versuch, die der damaligen Physik zugrundeliegende Vorstellung vom Atomismus durch eine Alternative zu ersetzen und damit einer Kritik zu unterziehen, mit dem Grundimpuls der romantischen Naturbetrachtung verbunden, "der die Einheit von Mensch und Natur, die Gleichwertigkeit von Erkennen und Vorstellen, von Wissenschaft und Poesie, von kritisch-ironischer Reflektiertheit und intuitiver Unmittelbarkeit des Gefühls wollte."³

1) Kant 1975, Bd. VIII, A 34f., S.49

2) Schelling 1799. Zur Naturphilosophie vgl. auch Farrar 1975 und Gower 1973

3) Wetzels 1973, 8

Wenn auch die romantische Physik Ritters und der Dynamismus für sich Varianten dieses Grundimpulses darstellen, so unterscheiden sich beide doch darin, daß der Dynamismus einen höheren Theoretisierungsgrad anstrebte und auch entwickelte als die im engeren Sinne romantische Physik. Pohl schreibt 1829 in seiner Rezension des Gehlerschen Wörterbuchs der Physik, daß sein Dynamismus der Theorie Ritters an theoretischen Einsichten überlegen sei: "Ritter mußte, nach einem Winckelmann'schen bedeutungsvoll von ihm zum Motto erwählten Ausdrücke: 'viel suchen, um wenig zu erblicken' weil ihm der Leitstern fehlte, dessen Offenbarung uns unwürdigen geworden ist. In seinem Lichte darf uns über die Bedeutung der Elektrizität, über die Bedeutung ihres Gegensatzes und damit auch über den Werth der auf den letzteren sich beziehenden Combinationen, namentlich von Ritter, kein Zweifel übrig bleiben."¹

Daß die dynamistische Theorie einen höheren Theoretisierungsgrad besaß, soll nicht heißen, daß Ritters Ansichten völlig theoriefrei waren. Die Mittel mit denen er seinen Stoff organisieren wollte, waren die Ideen der Polarität und Analogie: die Wirklichkeit wird verstanden als eine einzige Metamorphose des formalen Prototyps der Polarität. Mithilfe von Analogiebildungen kann man von einer Stufe und einer Manifestation der Polarität zur andern übergehen.

Allerdings gab es gegen Ende des dritten Jahrzehnts nur noch wenig Vertreter dieser Richtung. Muncke schreibt 1829, daß es den strengen Dynamiker "unter den eigentlichen Physikern nicht mehr giebt". Georg Friedrich Pohl

(1788-1849) war einer dieser wenigen. Er war der für Ohm im besonderen und die Elektrizitätslehre im Gesamten wichtigste Vertreter dieser Richtung. Er schrieb 1826 sein Hauptwerk "Der Prozeß der galvanischen Kette" und wurde berühmt-berüchtigt durch seine Rezension der Ohmschen Schrift in den "Jahrbüchern für wissenschaftliche Kritik" (1828); einer Zeitschrift, deren Redaktion er zusammen mit Hegel angehörte.

Im "Prozeß der galvanischen Kette" verwirft Pohl sowohl die Kontakttheorie Voltas als auch die chemischen Theorien als untaugliche Versuche. Nach Volta wird jedes Metall durch Berührung mit einer Flüssigkeit negativ elektrisch. (Diese Spannung ist jedoch vernachlässigbar klein im Vergleich zu der, die zwischen zwei sich berührenden Metallen entsteht.) Pohl findet durch Versuche heraus, daß es sich anders verhält: Metalle werden bei Berührung mit Flüssigkeiten umso mehr positiv, je weiter sie am negativen Ende der Voltaschen Spannungsreihe stehen und umgekehrt. Daraus schließt Pohl, daß der Flüssigkeit in der Säule nicht bloß die passive Wirkung zukommen kann, die ihr die Voltasche Theorie zugeschrieben hat. Da aber aus den Gesetzen der Elektrostatik klar sei, daß Ladungen immer paarweise auftreten, muß die metallabgewandte Seite der Flüssigkeit die entgegengesetzte Elektrizität annehmen. Wenn man aber nun im Lichte dieser Versuche immer noch der Berührung der Metalle die Hauptursache der Elektrizitätserzeugung zuweisen würde,

dann müßte eine Säule mit Wasser kräftiger wirken als eine Säule mit einer starken Säure, was nicht der Fall ist. Die Berührung der Säure mit den Metallen ruft nämlich eine Elektrizität hervor, die der durch die Metallberührung erzeugten entgegengesetzt ist, die Berührung mit Wasser jedoch nicht.

Aus diesem Sachverhalt zieht Pohl den Schluß, daß "bei einer Combination von Metallen und Flüssigkeiten, worin das Metall durch den Contact mit einem andern und durch den Contact mit einer Flüssigkeit zu entgegengesetzter Spannung aufgefordert wird, die Contactelektrizität nicht im Stande sey, jene andere durch die Flüssigkeiten bedingte, wenn sie auch am Electrometer sich als die schwächere erweise, zurückzudrängen, vielmehr nur dazu diene, die letztere zu steigern und entschiedener zu machen." In seiner Rezension des Buches von Pohl schreibt Moser dazu: "Dieser Satz begründet das System des Herrn Pohl, das Andre ergiebt sich aus ihm mehr oder minder direct."¹

Der Magnetismus entsteht nun nach Pohls Theorie aus dem Konflikt zwischen der Kontaktelektrizität (Metall-Metall-Berührung) und Erregungselektrizität (Metall-Flüssigkeit-Berührung) und bewirkt, daß jeder Punkt des magnetisch gewordenen Metalls gleichzeitig nord- und südpolar wird.

1) Moser 1829, 118. Vgl. Pohl 1826, 74. Ostwald schreibt dazu 74 Jahre später: "In der Erkenntniß der Bedeutung, welche die Berührung zwischen Flüssigkeit und Metall für die Theorie der Kette hat, ist Pohl auf einen ganz richtigen Weg gelangt. Als ich mich durch seine endlos schwülstigen Auseinandersetzungen zu seinen positiven Angaben durchgearbeitet hatte, war ich nicht wenig er-

Obwohl das den chemischen Theorien ziemlich ähnlich kommt, polemisiert Pohl auch gegen "das in seiner Einseitigkeit des Principis von innen heraus verfehlte System der Elektrochemie".¹ Er hält es für ungerechtfertigt, Säuren und Basen außerhalb der galvanischen Säule eine Elektrizität zuzuweisen. Außerdem lehnt er die Wanderung von Substanzen im elektrolytischen Prozeß zu den Polen ab und behauptet, wie Ritter, daß das Wasser in unzersetztem Zustand an dem einen Pol als Sauerstoff und am andern als Wasserstoff auftritt. Er wirft die Elektrochemie mit der, wie er sich ausdrückt, "Elektromanie" früherer Zeiten in einen Topf: er meint,

daß wir billigerweise von der Schwäche jener Elektromanie nicht als von etwas vorübergegangenem sprechen dürfen, das etwa einer geläuterten herrschenden Ansicht der Gegenwart gewichen wäre. Die elektrochemische Theorie unserer Tage hat im Gegenteil die vagen Gränzen jener elektrischen Universalmonarchie noch viel weiter, über das ganze Gebiet des Chemismus auszudehnen getrachtet und die meisten Verknüpfungen und Demonstrationen, in denen sie sich gefällt und zu behaupten wähnt, stehen, was bedeutungslose, nichtssagende Äußerlichkeit anbetrifft, noch ziemlich auf derselben Stufe, wie der Versuch mit den Kartenhäuschen, die Beccaria mit elektrischen Schlägen umwarf, und damit Erdbenen elektrisch erklären wollte.²

Pohl spricht hier also durchaus abträglich von den willkürlichen und im schlechten Sinne spekulativen Theorien, mit denen man ihn so gern in einen Topf wirft.

staunt, diese Angaben vollkommen den Erfahrungen entsprechend zu finden, welche erst in neuester Zeit über diese Frage gewonnen worden sind." Ostwald 1896, 472

1) Pohl 1826, S.XII

2) Pohl 1829, 40

Da die elektrischen Erscheinungen durch Wirkungen verschiedener Polaritäten aufeinander erklärt werden, kann von der Strömung eines Fluidums im Leiter oder der Säule keine Rede sein: "Die gewöhnlichste und zugleich schädlichste Folge der gleich von vorn herein in die Phänomenologie eingeführten falschen Voraussetzung isolirt bestehender Causalverhältnisse ist bei den electrischen Erscheinungen, durch die überall wuchern-
de Vorstellung einer in Bewegung begriffenen, strömenden Electricität, bis zu höchsten Grade ausgebildet."¹

Stattdessen scheint Pohl unter Elektrizität im galvanischen Stromkreis einen speziellen Erregungszustand der Materie zu verstehen, eine Disposition ("Tendenz") zum chemischen Prozeß, weder die Ursache dieses Prozesses noch dessen Folge: "Chemismus und Elektrizität sind dem Wesen nach identische Tätigkeitsäußerungen der Materie."² Die Leitung der Elektrizität beruht auf "einem undulatorischen Wechsel positiv und negativ elektrischer Erregung, die in den Metallen sich noch in einem Zustande embryonischer Unaufgeschlossenheit, in den Flüssigkeiten aber in einer für die nähere Prüfung auf das Entschiedenste ausgebildeten Sonderung, gleich dem Gegensatze der magnetischen Polarität, versichtbart."³

Das Verständnis von Pohls Hauptwerk wird getrübt durch einen geschwollenen Stil mit langatmigen und geschachtelten Sätzen. Außerdem bricht Pohl immer wieder

1) Pohl 1829, 432

2) Moser 1829, 252; vgl. Pohl 1826, 1 und 202

3) zitiert nach Fechner 1829, S. VIII

in Beschimpfungen auf die etablierte Physikergemeinschaft aus, wie z.B. dieser:

Unter den im Gebiete des Erkennens zu einer transitorischen Herrschaft gelangten Traumidolen, die mit dem erlogenen Schein einer regelnden Leitung nichts als Verwirrung und Widerspruch erzeugt haben, gibt es keines, durch welches die Wissenschaft härter und unverantwortlicher despotisiert worden wäre, als das Phantom der materiellen Substantialität eines elektrischen Fluidums", das er dann noch ein "gigantisches Gespenst" und den "Urgötzen der neuern Physik" nennt.¹

Gleichwohl zeichnen sich Pohls weitere Arbeiten durch weniger große Überheblichkeit und Dunkelheit des Ausdrucks aus. Auf jeden Fall kann man ihm nicht grenzenlose Spekulation vorwerfen. Daß er die verschiedensten und durchaus ernstzunehmende Versuche durchgeführt hat, die mit denen der Atomisten in der Qualität vergleichbar sind, zeigen seine vielfältigen Artikel in Gilberts und Poggendorffs Annalen und Kastners Archiv, auf die sich auch Ohm in seiner "Galvanischen Kette" bezieht. Der Topos des fehlenden Experiments, der sich immer wieder in historischen Darstellungen findet², muß für den in Frage stehenden Zeitraum und für die Person Pohls zumindest modifiziert werden. Es ist bei Pohl immer wieder die Rede davon, daß Spekulation und Experiment gleichwertig seien und sich zu ergänzen hätten. Im gleichen Sinne spricht sich Joseph Weber, ein anderer zeitgenössischer Dynamist aus:

Daraus wird aber auch klar, daß überhaupt die Naturforschung, welche eine wissenschaftliche Tendenz nimmt, und sonach auf das Erkennen der Dinge an sich, und auf das Verstehen ihrer Erscheinungen ausgeht,

1) Pohl 1826, 228

2) z.B. Gerlach 1960, ²³⁸₂₅₀; Winter 1944, ^{edition}

weder rein speculativ, noch rein empirisch sein dürfe, sondern in ihr sich Speculation und Empirie vereinen müssen.¹

Auch in Mathematik war Pohl nicht unbewandert. Er gab in zwei Artikeln eine Methode an, wie man die Stellung der Magnetnadel über stromdurchflossenen Leitern berechnen kann für beliebig gegen den Horizont geneigte Leiter; eine Berechnungsweise, die der Atomist Muncke sehr lobt.² In der selben Arbeit gibt Pohl auch eine Beschreibung eines Gyrotrops (Stromwender), das vielfache Verwendung fand.

Die Reaktion auf Pohls Werk war unter den Physikern sehr zwiespältig. Es reichte von totaler Ablehnung bis zu neutraler Toleranz. Berzelius schrieb in seinen Jahresberichten über die "Galvanische Kette": "Wenn ein sinnloses Wortgepränge und absurde Vergleichen Mangel an Sache ersetzen könnten, so würde jener Titel vielversprechend sein. Nun muß man nur beklagen, daß nicht Alle bedenken, daß in den Wissenschaften selten das bekannte Sprichwort gilt: tamen est laudanda voluntas."³ Andererseits wird Pohl von Fechner in dessen Lehrbuch des Galvanismus" neben Ohm, Pfaff und Bischoff unter diejenigen deutschen Physiker eingereiht, die sich "hauptsächlich" und "mit einigem Eifer" mit dem

1) Weber 1819, 6.

2) Pohl in Gilb. Ann. 74, 389; 75, 269. Muncke 1827, 578 & 639f.

3) Berzelius VI, 1827, 31. Seyffer gibt 1848, noch zu Lebzeiten Pohls, folgendes Urteil ab: "Wären diese naturphilosophischen Spielereien im "Process der galv. Kette" bei Seite gelassen, so würde seine Theorie einen ganz andern Stand in der Wissenschaft eingenommen haben, da sie in der That viele ausgezeichnete Forschungen enthält; auf diese Weise wurde sie von Vielen unbeachtet hintangesetzt." Seyffer, 1848, 205.- Zu dem Urteil

Galvanismus beschäftigen.

Pfaff setzte sich mehrere Male ausführlich mit den Versuchen von Pohl auseinander. Er muß sich ziemlich anstrengen, um die Erfahrungen, die Pohl vorbringt, mit der Voltaschen Kontakttheorie und dem Atomismus in Einklang zu bringen. In einigen Fällen muß Pfaff in der Tat einräumen, daß Pohl Ergebnisse erzielt hat, die für die Kontakttheorie Anomalien darstellen. Folgerichtig ist Pfaffs Haupteinwand gegen Pohls Theorie nicht empirischer Natur, sondern bewegt sich auf einer, wie wir heute sagen würden, wissenschaftstheoretischen Ebene. Im Gehlerschen Wörterbuch kommt er nach einer ausführlichen Beschreibung der Pohlschen Theorie zu dem Schluß:

Ich gestehe aufrichtig, daß ich in diesen und allen übrigen damit übereinstimmenden, mit einer großen Konsequenz durchgeführten Erklärungen der Erscheinungen der Säule in ihren verschiedenen Abänderungen die Charaktere einer ächten physikalischen Theorie vermisste, welche nur solche Ursachen zur Erklärung von Erscheinungen zu Hülfe nimmt, die sich mit andern ausgemachten und durch Erfahrung erwiesenen Ursachen vergleichen lassen, und deren Wirkungsart sich durch die Gesetze der Wirksamkeit solcher unleugbar erwiesenen Ursachen verdeutlichen läßt, einer Theorie, welche die Analogie mit andern als richtig erwiesenen Erklärungen für sich hat. Die Kräfte, welche Pohl zu Hülfe nimmt, müssen geradezu für qualitates occultae, nicht sehr verschieden von dem ganz alten Horror vacui erklärt werden, die nach einem ganz willkürlich und bloß zum Behuf der Erklärung postulierten Gesetze thätig seyn sollen.¹

(Der Vorwurf, Pohl postuliere in seiner Theorie eine qualitas occulta, trifft genauso auf Pfaff zu, wie er selbst an anderer Stelle² zugegeben hat.)

von Berzelius hat Brandes bemerkt: "auffallend ist daher die Härte, mit welcher er Pohl in Berlin (S.31) abfertigt; denn wenn gleich der Vorwurf einer, in dunkle Worte eingehüllten Darstellung einigen Grund hat, so ist der Ausdruck 'sinnloses Wortgepränge' doch wohl zu bitter." Brandes
1) Pfaff 1828, 821. Vgl. Pfaff 1837 & 1845 1827, 1798
2) s. oben S.38

Pfaff und Pohl werfen sich in ihrer Auseinandersetzung gegenseitig vor, sie würden sich mit vorgefaßten Meinungen den Blick auf die Versuche und die Natur selbst verstellen.¹ Jeder von beiden glaubt, daß die Kraft oder Kräfte, die am Anfang der galvanischen Aktion ^{stehen} stehen, durch Versuche genügend nachgewiesen sind. Mit einer ähnlichen Schwierigkeit hat schon Roger Cotes 1713 bei der Herausgabe der zweiten Auflage von Newtons Principia ^{zu kämpfen} gehabt. Er setzt sich im Vorwort auseinander mit dem Einwand, den man gegen Newton vorgebracht hat, die Schwerkraft sei eine "verborgene Ursache": "Diesen erwidert man leicht, daß diejenigen Ursachen keine verborgenen sind, deren Dasein durch Beobachtungen auf's deutlichste erwiesen wird, sondern nur diejenigen, deren Existenz, verborgen oder erdichtet, aber noch nicht erwiesen ist. Die Schwere wird daher keine verborgene Ursache der Erscheinungen am Himmel sein, indem aus den Erscheinungen selbst dargethan worden ist, daß sie wirklich existiren."² Pohl und Pfaff waren in dieser Situation nicht in der Lage, gemeinsame Kriterien auszubilden, nach denen man die Frage nach den Ursachen des elektrischen Stromflusses einer Lösung hätte näherbringen können. Für Pfaff war die Annahme eines durch Metallkontakt erregten Fluidums durch die daraus abzuleitenden Erscheinungen hinreichend bewiesen, während Pohl im "Stromfluß" nur die Aktion einer polaren Erregung der Materie sah.

1) Pohl 1829, 427. Vgl. auch Pfaff 1828, 630, 817, 996 ff.
2) Newton 1963, 11

In einem ähnlich gelagerten Fall hat Pfaff ganz klar erkannt, daß es sich bei solchen Auseinandersetzungen um eine Unvereinbarkeit von Theorien handelt, der mit mehr und besseren Versuchen nicht beizukommen ist. An Gilbert, den Herausgeber der Annalen der Physik, schreibt er 1801:

Die 5 neuesten Stücke Ihrer Annalen, die erst seit einiger Zeit in meinen Händen sind, enthalten herrliche Beiträge zur genauern und tiefern Kenntniss der Gesetze der Erscheinungen, welche durch Volta's Säule vermittelt werden. Vieles, was ich Ihnen als Neu mittheilen wollte, ist in Ritters Briefen nicht bloß schon angedeutet, sondern erschöpft. Indessen hat eben der langsame, nichts gleichsam hinter sich lassende Gang dieses musterhaften Experimentators seine Fortschritte zum Ziele etwas aufgehalten, und die Ansicht der Erscheinungen der Volta'schen Säule aus einem zu allgemeinen und hohen Standpunkte ihn einigermaßen gehindert, eine Erklärung zu suchen, die, wenn er auch auf sie gekommen wäre, ihm doch vielleicht nicht einmahl Genüge geleistet haben würde. Nach dem Gang seiner Untersuchungen und nach der ganzen Tendenz seines Geistes sehe ich voraus, daß er gegen Voltas Erklärung, die durch van Marum's mit mir gemeinschaftlich angestellten Versuche sich vollkommen bestätigt hat, nicht bloß vieles einzuwenden haben, sondern daß er überhaupt dergleichen Erklärungen gar nicht gelten lassen wird. So manches sich auch vielleicht aus dem Standpunkte des Natur-Metaphysikers dagegen möchte einwenden lassen, so bin ich doch davon überzeugt, daß es der Physiker Volta'n Dank wissen wird, das Problem der Säule so weit aufgelöst zu haben, und auf jeden Fall sind Volta's Versuche ein unschätzbarer Beitrag.

In diesem Text sieht man recht deutlich eine Haltung, wie man sie häufig bei jenen Vertretern von Theorien findet, welche sich ihren Gegnern, rational oder institutionell, überlegen fühlen: Indem er Ritter aus der "wirklichen" Physik verbannt in die Metaphysik, bestärkt Pfaff sich selbst und seinen Adressaten in der eigenen Überzeugung und verfestigt die Unanfechtbarkeit der eigenen

Urteile gegenüber der alternativen Erklärungsweise Ritters.

Es sei nun noch ein Hinweis darauf erlaubt, welche gesellschaftlichen Ursachen möglicherweise in Deutschland mit dazu geführt haben, daß das Vertrauen in die rein Bacon'sche Strategie einerseits und in die romantisch-dynamistische Naturphilosophie andererseits erschüttert wurde und ein atomistischer Theoretisierungsprozeß einsetzte und sich durchsetzte. Nach den Höhenflügen der literarischen, philosophischen und auch physikalischen Romantik mit ihrer politischen Unruhe gewann eine nüchter-nere poesielosere Betrachtungsweise, gewollt oder gezwun-genermaßen, immer mehr Raum. Den Regierungen in Deutsch-land mußte diese Straffung des Denkens willkommen sein nach den chaotischen und unübersichtlichen Geistesströ-mungen, die mit der Romantik einhergingen. Man denke nur an den "Mesmerismus" nach der Entdeckung der Hypnose, den "tierischen Magnetismus", die Spekulationen mit der Wünschelrute und dem Pendel, die alle mit der Elektrizi-tät und dem Elektromagnetismus in Verbindung gebracht wurden. Die Vorliebe für derlei Ideen wuchs zu einer Art Volksseuche aus, von der auch mancher Physiker an-gesteckt wurde. Besonders wild trieb es in dieser Hin-sicht J.W.Ritter, der auch nicht das öffentliche Gespött und Gelächter scheute, als er zusammen mit einigen wei-teren Mitgliedern der Bayerischen Akademie der Wissen-schaften an einem geheimen Orte einen nackten weiblichen Körper bependelte, um die Wirkungen der weiblichen Kör-

perregionen auf das Pendel zu untersuchen.¹

Muncke macht indirekt gerade die zu starke staatliche Gewalt dafür verantwortlich, daß solche Schwärmerien überhaupt entstehen konnten: "Wirkte insbesondere äußerer Druck und eine Beschränkung der politischen und Denkfreiheit dazu, daß für den Verlust mancher äußeren Rechte ein Ersatz in dem Vermögen alles zu erkennen und alles zu erklären gesucht wurde, so artete die Naturphilosophie meistens in eine Afterphilosophie aus."²

In einem Pamphlet, das sich gegen Schelling, Ritter und Baader ("das transzendente Triumvirat") richtete, fordert Franz von Spaun, daß diese "Afterphilosophie" von Staats wegen unterdrückt werden müsse:

Eine philosophische Lehre, zu deren Anerkennung ein sechster Sinn nothwendig ist, den die Natur nur einer privilegierten Caste mittheilet, begründet eine Schulfuchs-Aristokratie, eine Illuminaten-Regierung. Angeblich physische geheime Naturkräfte, die nur einzelnen mit spezifischer Organisation begabten Menschen zu Gebote stehen, begründen Orakel. Keine kluge Regierung darf hierüber die Augen schließen, und solchem Unkraute Zeit lassen tiefe Wurzel zu schlagen. Die Gefahr ist wohl dringender, als man wähnt.

Denn Weh! Weh! wenn das Unglück wollte, daß solcher Unsinn bey den Machthabenden Glauben fände, und der Staatsrath irgend eines Landes sich bey solchen Phytionissen Rathes erhollte; denn man vergesse ja nicht, was ich vorhin sagete: Der, welchem ein accreditirtes Orakel zu Gebote steht, ist Herr im Lande. Auf den Teufel und das Spuken der armen Seelen gründete das Mönchthum sein Reich moralischer Finsterniß, die so sehr nlich zurückgewünschte Monchoarchie[sic] des Mittelalters.³

Zwar sind diese Ausfälle gegen eine frühere Generation gerichtet, der Pohl geistig wohl nicht zuzurechnen ist.¹⁸⁴²

1) Spaun 1817, 46

2) Muncke 1829, 7

3) Spaun 1817, 33f. und 48

Es ist aber zu vermuten, daß die staatlichen Organe sich in ihrem Verhältnis zur Wissenschaft tatsächlich von ähnlichen Überlegungen leiten ließen, und so indirekt dazu beitrugen, daß Pohl und ähnliche Forscher unter ihren Fachgenossen keine volle Anerkennung ernteten.

Friedrich Wilhelm III, König von Preußen, verfügte am 11. April 1798 an die Berliner Akademie der Wissenschaften:

Ich kann der Akademie nicht bergen, daß das Ganze ihrer Arbeiten mir immer nicht genug auf den allgemeinen Nutzen hingerichtet zu seyn schien. Man hat sich zu sehr darauf eingeschränkt, abstrakte Gegenstände auseinander zu setzen, die Metaphysik und spekulativen Theorien mit gelehrten Entdeckungen zu bereichern, und man hat nicht daran gedacht, die Einsichten auf wahrhaft nützliche Gegenstände zu richten, auf die Vervollkommnung der Künste und Gewerke, ein sehr wichtiges Verdienst, wodurch sich zum Beispiel die Akademie zu Paris, unerachtet ihrer mannigfachen Mängel und ihrer fehlerhaften Organisation ehemals auszeichnete. Ich wünsche daher, daß die Akademie zu Berlin sich, so zu sagen, mehr humanisirte, als bis dahin geschehen ist, daß sie weniger die spekulativen Untersuchungen begünstigte, als die Bemühungen zum Glück des gemeinen Lebens, und zur Vervollkommnung alles dessen beizutragen, was mit seinen Bedürfnissen und Vergnügungen in Verbindung steht, durch eine beständige Anwendung der Theorie auf die Dinge selbst; daß sie die Nationalindustrie weckte, die, so oft aus Mangel der nothwendigen Einsichten in neuen Gattungen vergebliche Versuche macht, indem sie dieselbe mit den wahren Grundsätzen über denjenigen Theil, womit sie sich beschäftigt, ausrüstete; daß sie die verschiedenen Systeme der sittlichen und gelehrten Erziehung von den unbestimmten und irrigten Grundsätzen reinigen möge, welche die Mode und die Phantasie einiger exaltirten Pedagogen eingeführt haben, und welche das Verderben der Nachkommen besorgen lassen; daß sie eben so die Vorurtheile und den Aberglauben des Volks unterdrücken möge, als die zügellosen, und zerstörenden Grundsätze der falschen Philosophie unserer Zeit. Nur dann, wenn die Akademie die Arbeiten der verschiedenen Klassen derselben auf Gegenstände dieser Art, und auf andere von gleich heil-

samen Einfluß, auf das Wohl des Staats, und seiner Unterthanen lenkt, kann sie die ehrenvollsten Ansprüche auf den Dank des Publikums sich erwerben.¹

Durch die Tradition, aus der er kam, und durch seine Erscheinungsweise in der Öffentlichkeit wurde der Dynamismus am ehesten solcher Vorwürfe verdächtigt, wie sie von Spaun und Friedrich Wilhelm vorgebracht wurden.

Man vermutete, daß sich der Dynamismus, ähnlich wie die Rittersche Physik, zu einer Art Geheimwissenschaft ^{entwickeln} könnte, der nur Eingeweihte folgen konnten und die anstatt Nutzen nur Schaden für die Gesellschaft brächten. Eine solche Aussicht widerstrebte aber dem aufklärerischen Ideal der damaligen Zeit, das die privilegierte Wissensform ablehnte und die Möglichkeit einer unterschiedslosen Teilhabe aller Subjekte am Erkenntnisprozeß, zumindest abstrakt und formal, forderte (ganz in Parallele zu den politischen Forderungen der Französischen Revolution) und nur so den Nutzen der Wissenschaft für das Allgemeinwohl überhaupt ermöglicht und gewährleistet sah.

2.3 Anschauung und Mathematik

In der Beschreibung des Dynamismus Pohl'scher Prägung ist ein äußerst wichtiger Grundzug vernachlässigt worden: die Auffassung vom Verhältnis der Mathematik zur Naturwissenschaft. Gerade aber in dieser Auffassung läßt sich bei den Dynamisten kein grundsätzlicher, höchstens ein gradueller ^{Unterschied} feststellen. Es handelt sich dabei um eine Einstellung, die der Physik in Deutschland zu Beginn des 19. Jahrhunderts im Ganzen fast ohne Ausnahme eigen ist und sich von der Romantik herleitet.

1) Zitiert nach Yelin 1822, 73f.

Am entscheidendsten ist hier der Begriff der Anschaulichkeit: die Physik hat Prinzipien zu entwickeln, die die meditative Anschauung der Natur gestatten. Die Mathematik kann unter Umständen dazu mithelfen, aber niemals ist die Mathematisierung der Erfahrung das Ziel des physikalischen Bemühens.

Auf den ersten Blick scheint die Auffassung von Novalis, der sich von allen Romantikern wohl am intensivsten mit Mathematik auseinandergesetzt hat, dem zu widersprechen. Er schreibt: "Alle Wissenschaften sollen Mathematik werden."¹ Damit scheint er mit Kants Maxime übereinzustimmen, "daß in jeder besonderen Naturlehre nur so viel eigentliche Wissenschaft angetroffen werden könne, als darin Mathematik anzutreffen ist".² Für Novalis hat die Mathematik jedoch eine ganz bestimmte Bedeutung, die von Kants und unserem Verständnis abweicht. Das ebengenannte Zitat lautet weiter: "Die bisherige Mathematik ist nur die erste und leichteste Äußerung der Offenbarung des wahrhaft wissenschaftlichen Geistes." Die Mathematik der Zukunft ist für Novalis hingegen "poetisierte Mathematik", die in einem Prozeß "progressiver Generalisierung" schon fast magische Züge annimmt: "Jede mathematische Wissenschaft strebt wieder philosophisch zu werden - animiert oder rationalisiert zu werden - dann poetisch - endlich moralisch - zuletzt religiös."³

1) Novalis III, 18; vgl. auch Dyck 1959

2) Kant 1975, Bd. VIII, A VIII = S. 14

3) Novalis III, 257; vgl. auch 295f.

Auf ihrer untersten Stufe hantiert die Mathematik mit Zahlen und Größen, auf der nächsten Stufe mit Buchstaben, dann mit Qualitäten, bis sie schließlich ein alles umfassendes Begriffssystem wird, eine wahre "arithmetica universalis". Am Ende dieses Mathematisierungsprozesses steht der direkte Zugang des Subjekts zur Natur. In diesem Sinne ist auch die berühmte poetische Vision von Novalis zu verstehen: "Wenn nicht mehr Zahlen und Figuren/ sind Schlüssel aller Kreaturen..." Zahlen und Figuren werden auf dem Weg des Menschen zum Verständnis der Natur nur auf einer niederen Stufe gebraucht. Auf der höchsten Stufe der Anschauung wird der Mensch eins mit der Natur: "Absolute Wahrheit für uns ist Identität der Anschauung und des Wesens eines Objekts"¹, die *adæquatio rei et intellectus* wird romantisch umgedeutet.

Für Kant war Anschauung und Mathematik noch vereint: "Also wird, um die Möglichkeit bestimmter Naturdinge, mithin um diese a priori zu erkennen, noch erfordert, daß die dem Begriffe korrespondierende Anschauung a priori gegeben werde, d.i. daß der Begriff konstruiert werde. Nun ist die Vernunftserkenntnis durch Konstruktion mathematisch."² Allerdings ist hier die reine Anschauung von Raum und Zeit gemeint, die nur die Form der empirischen Anschauung darstellt.

Für J.W.Ritter spielt Mathematik eine sehr untergeordnete Rolle. Gegen Ende seines Lebens versucht er in zu-

1) Novalis II, 285

2) Kant 1975, Bd.VIII, A IX = S.15

nehmendem Maße, Experimente zu erfinden und auszuführen, deren Grundidee es ist, "die chemischen, elektrischen, optischen und akustischen Erscheinungen gewissermaßen zur schriftlichen Aussage über sich selbst zu veranlassen."¹ So sah er beispielsweise in den Lichtenbergschen Figuren eine solche direkte Offenbarung der Natur, die sich ohne Mathematik kundgibt.

Wie ist nun das Verhältnis der Zeit zu den schon in hohem Maße mathematisierten Naturwissenschaften, wie besonders die rationale Mechanik, zu sehen? D'Alembert, Euler, Laplace u.a. waren der Auffassung, Statik und Dynamik seien apriorische Wissenschaften. Für Kant ist der Gegenstand der reinen Mathematik, wenn sie sich mit der einen reinen Anschauungsform, der Zeit beschäftigt, die Mechanik. Gegen Ende des 18. Jahrhunderts stellte die Berliner Akademie der Wissenschaften eine Preisfrage: ob die Gesetze der Mechanik empirisch oder a priori seien.² Wer eine mathematikfreie Physik propagierte, konnte also ohne weiteres die Errungenschaften der mathematisierten Naturwissenschaften mit Hinweis auf ihren apriorischen Charakter anerkennen und würdigen. Der Streit über den wahren Charakter der Mechanik dauerte fort bis weit ins 19. Jahrhundert.

In den Physikbüchern zu Beginn des Jahrhunderts findet sich oft eine vermittelnde Haltung: Physik als empirische Wissenschaft orientiert sich zuerst einmal an der direkten empirischen Anschauung und sucht nach höchster

1) Wetzels 1973, 91

2) Laudan 1968, 28

Anschaulichkeit zu streben. Mathematik darf dann, und nicht vorher, verwendet werden, wenn die Vorstellungskraft des Menschen nicht mehr hinreicht, sich einen anschaulichen Begriff von der Natur zu machen. In diesem Sinne schreibt der Atomist G.W.Muncke in der Einleitung zu seinem "Handbuch der Naturlehre":

Wenn man die Resultate aller mit größter Genauigkeit angestellter Beobachtungen und Versuche zusammenstellt, und aus ihnen die allgemeinen Gesetze der Natur entwickelt, letztere alsdann nach ihrem notwendigen Zusammenhange, mit Beseitigung alles inneren Widerspruches zu vereinigen sucht, so heißt dieses Philosophie der Natur, oder Naturphilosophie. Um aber hierbei Theils eine festere Bestimmtheit vorzüglich der Zahlengrößen zu erreichen, theils da, wo die anschaulichen Begriffe bei der Betrachtung des Unendlichen in der Natur schwinden, und die Menge der zu vereinigenden Thatsachen nicht mehr vom Verstande umfaßt werden kann, wenigstens die Hauptresultate der Beobachtungen im einfachsten Ausdrucke festzuhalten, bedient man sich der Mathematik, welche also neben der Logik die einzige Hilfswissenschaft der Naturforschung im Allgemeinen,¹ hauptsächlich aber der Physik genannt werden muß.

Auch bei J.S.C.Schweigger steht die meditative Anschauung der Natur im Vordergrund:

Jede Theorie gehört der Zeit an, worin sie entstand, und hat im Grunde keinen anderen Zweck, als die bekannten Erscheinungen unter einen Gesichtspunct zusammenzufassen, von welchem aus ein erfreuliches Beschauen (ᾠεωρεῖν) derselben möglich ist. Wenn nun zahlreiche neue Erscheinungen hervortreten: so werden neue Gruppen sich bilden, und daher neue Gesichtspuncte, d.h. neue Theorien, von selbst sich darbieten.²

In ähnlicher Weise wünscht Pfaff 1824 seinen Lesern, sein Buch möge "in dem stillen und reinen Genusse, den die klare Anschauung und erweiterte Erkenntniß der einfachen und unwandelbaren Gesetze, unter welchen die

1) Muncke 1829, 6

2) Schweigger.Journ. 52, 1828, 65

schöne Ordnung der Natur besteht und ihr stets reges Leben seinen ruhigen Rhythmus hält,... einigen Ersatz verschaffen für den Schmerz, womit der Anblick der Verwirrung und des Haders in den Gebieten, wo der Mensch selbst das Gesetz zu geben hat, in unsern Tagen so oft tief verwundet."¹ Jedoch gesteht er später der Mathematik doch eine vergleichsweise höhere Stellung zu als Schweigger und Muncke:

Weiter als eine, um mich so auszudrücken, mathematische Erklärung, die nur eine Formel für die Größenbestimmung der Erscheinungen aufstellt, dringt die physikalische. Sie sucht die Erscheinungen in ihrem großen, allgemeinen Zusammenhange mit dem ganzen Naturleben darzustellen, und das Datum, von welchem die mathematische Construction ausgeht, selbst noch höher an dieß Wesen der Naturkräfte selbst anzuknüpfen, und so über das Qualitative in den Erscheinungen Rechenschaft zu geben. Indessen muß jede ächte physikalische Erklärung zugleich eine mathematische seyn. ...
Durch ein solches mathematisches Gesetz werden gleichsam alle Erscheinungen in reine Anschauungen aufgelöst; von allem eigentlich Qualitativen entkleidet.²

Aber trotzdem steht auch hier die physikalische Erklärung höher als die rein mathematische. Offensichtlich greift hier Pfaff auf Kant zurück, aber man kann nicht gerade sagen, daß er sich einen klaren Begriff von Kants Ideen verschafft hätte. Im übrigen bleibt Pfaffs Forderung nach der mathematischen Fassung physikalischer Erklärungen ein reines Lippenbekenntnis. In seinem ganzen Werk kommt nicht mehr Mathematik zum Vorschein als die Grundrechnungsarten.³

1) Pfaff 1824, S. VIIIf.

2) ibid. 201 und 200

3) Genau diese Haltung kritisierte auch Pohl. Pfaff bringt in Gehlers Wörterbuch die seines Erachtens richtige Physik mit dem Werk der großen Franzosen Poisson, Laplace usw. in Verbindung, allerdings ohne eine einzige Formel von ihnen anzuführen: "An der Stelle so vieler unzeitiger Reflexionen... wäre es dem Zwecke des Wörterbuchs angemessener gewesen, wenn

Von ähnlichem Geiste durchdrungen ist die Auffassung Pohls: In seiner Rezension des Gehlerschen Wörterbuchs der Physik kritisiert er die "französische Physik" dafür, daß sie "schon aus bloßer Veneration vor den mathematischen Formeln [in der Physik] zu allen weiteren Zugeständnissen bereit" sei und meine, nur mit Experiment und Calcül" bei der Naturbetrachtung auszukommen "ohne die gründliche Schule einer gediegenen concentrirten Anschauung".¹ Zum Kronzeugen dafür, daß "die vorläufigen Suppositionen", an die der Mathematiker "das Gespinnst seines Calcüls" hängt, keine "unerschütterlichen Grundpfeiler der physikalischen Betrachtung" darstellen, zitiert er sogar Newton:

Ob die elastischen Flüssigkeiten aber aus Teilchen bestehen, welche von einander wechselseitig fliehen, ist eine Frage der Physik. Wir haben auf mathematische Weise die Eigenschaften von Flüssigkeiten hergeleitet, welche aus derartigen Teilchen bestehen, um den Naturforschern Veranlassung zu geben, jene Frage zu behandeln.²

Pohl vertritt eine Art physikalischen Realismus und spricht der Mathematik die Möglichkeit ab, etwas wesentliches zu einem realistischen Naturbild beizutragen.

Im selben Tenor ist die Rezension von Ohms "Galvanischer Kette" gehalten. Pohl argumentiert darin, daß durch eine mathematische Fassung der Gegenstände der Naturlehre eine Menge von Aspekten des ursprünglichen Stoffes ganz verloren gehe und schon deshalb die Physik nicht mathematisch sein dürfe. Jeder, der die wahrhafte Aufgabe der Naturwissenschaft nicht aus dem Auge verloren

vom Verf. darin eine Darstellung des Hauptinhalts der Poisson'schen Memoiren...versucht worden wäre." Pohl 1829, 446
1) Pohl 1829, 445
2) Newton 1963, II,33 = S. 294f.

habe, müsse mit ihm darin übereinstimmen,

daß es nicht sowohl die Physik als vielmehr nur die Mathematik sei welche durch diese Fortschritte [Newtons und Laplace] die Größe des eigenen Gebiets erweitert habe, daß in ihnen nur der Triumph der Lösung großartiger mathematischer Aufgaben gefeiert werde, die, indem sie von ausdrucksvollen und beziehungsreichen Erscheinungen des Naturlebens entnommen wurden, diese dafür in einer Einseitigkeit der Abstraction festhielten, mit welcher sofort auch die Naturlehre den ursprünglichen Gehalt ihrer Forschung aufgab, und unter dem täuschenden Abglanz einer fremden Vollkommenheit ihres eigenen lebendigen Geistes sich gänzlich entäußerte.

Das Streben nach möglichst mathematikfreier Anschaulichkeit, die noch Baconianisch beeinflusste Suche nach dem "Wesen" der Elektrizität, sowie das Streben nach einem einigenden naturwissenschaftlichen Prinzip determinierte gleichermaßen für den Atomismus wie für den Dynamismus die Art der physikalischen Modellvorstellungen, die zur intellektuellen Bewältigung der elektrischen Erscheinungen als sinnvoll angesehen wurden. Ich möchte dies Art von physikalischen Modellen "anschauliche Vorstellungsmodelle" nennen und sie von einem anderen Modelltyp, den "phänomenalistischen Modellen" abgrenzen.

Wir sahen, daß nach der Entdeckung der galvanischen Elektrizität verstärkt nach dem Wesen, der Beschaffenheit der Elektrizität und Identitätskriterien dafür gefragt wurde. Typische Antworten darauf waren etwa: Elektrizität ist Feuer, ist Phlogiston, Wärmestoff, Licht usw. Später wurde dann die Antwort gegeben: Elektrizität ist zumindest ein Stoff, bzw. eine Kraft (oder das Zusammenspiel mehrerer Kräfte). Man hat der bloßen Fest-

stellung von der Form: "Elektrizität ist ein X" oder "Zwischen Elektrizität und X besteht eine Analogie" einen hohen kognitiven Wert zugemessen. Es wurde nicht weiter auseinandergesetzt, welche Eigenschaften der Elektrizität nun konkret mit Eigenschaften von X in Beziehung treten. Das war auch weiter nicht wichtig, denn die Feststellung: "Elektrizität ist X" war nur schwer und auf Umwegen über andere Bereiche falsifizierbar. Nehmen wir an, jemand hätte widerlegen wollen, daß Elektrizität Phlogiston sei, dann hätte ihm der Hinweis darauf, daß sich Elektrizität unter den und den Umständen so und so verhält, Phlogiston unter den gleichen Umständen aber ganz anders, garnichts eingebracht. Der Verteidiger der Phlogiston-These würde antworten: Phlogiston kommt in verschiedenen Zustandsformen o.ä. vor; in der Form von Elektrizität verhält sich Phlogiston eben anders als wenn es nicht Elektrizität ist. Es kam den Naturforschern also garnicht so sehr darauf an, anschauliche Modelle zu erfinden, die man mit Hilfe von Experimenten überprüfen, also bestätigen oder widerlegen kann, sondern die man als erklärendes und einigen des Grundprinzip auf einen möglichst weiten Erfahrungsbereich ausdehnen kann. Naturwissenschaft ist also eher eine ars inveniendi als eine ars demonstrandi. Man findet diese Einstellung zum Beispiel bei H. W. Brandes:

In keinem Zweige der Physik hat sich die Kunst zu errathen, welche Erscheinungen sich an die schon bekannten anknüpfen mögen, die Kunst durch geschickte Anordnung von Versuchen den Grund der Erscheinungen zu erforschen und die Wahrheit der Hypothesen zu prüfen, glänzender gezeigt, als in der Lehre von

der Electricität, wo nicht selten ein einziger neuer Versuch die Grundlage einer ganzen Reihe überraschender und durch wohlgeordnete Versuche bestätigter Kenntnisse wurde.

Das Experiment ist in dieser Natursicht also nicht abgeschlossen, es hat nur einen anderen Stellenwert. Man versucht durch das Experiment nicht, die einzelnen Züge der Elektrizität mit dem X zu vergleichen, mit dem man sie identifiziert, sondern versucht herauszubekommen, ob das anschauliche Prinzip, unter das ein Bereich subsumiert wurde, noch auf weitere Bereiche ausgedehnt werden kann, und worin der Zusammenhang des einen Prinzips mit anderen besteht. Die Rittersche Physik z.B. sah im Galvanismus das "Zentralphänomen" der gesamten Natur. Diese Vorstellung mündete schließlich in einen magischen Galvanismus, der mit Wünschelrute, Siderismus, Mesmerismus usw. die Versöhnung und Einheit von Mensch und Natur herbeiführen wollte.

In den anschaulichen Vorstellungsmodellen, auch in der abgeschwächten und abstrakteren Form des Atomismus naturphilosophischer Prägung, bzw. des Dynamismus, finden sich derartige Grundimpulse des romantisch-naturphilosophischen Naturgefühls wieder: möglichst begriffsfreier Aufschluß über die Natur durch intuitive Unmittelbarkeit und Anschaulichkeit, Deutung der Natur aus einem einigenden und einheitlichen Prinzip heraus, Gleichwertigkeit von Erkennen und Vorstellen.

1) Brandes 1830, III, 205f.

Einem anderen Impuls folgt die Physik, wenn sie mit "phänomenalistischen Modellen" umgeht. Unter solchen Modellen verstehe ich beispielsweise die Analogie, wie sie Christiaan Huygens zwischen den Wellenbewegungen des Wassers und dem Verhalten des Schalles und Lichtes gezogen hat. Mit der Konstatierung dieser Analogie allein verknüpft Huygens an sich noch keinerlei Erkenntniswert. Es liegt darin vielmehr die Aufforderung, unter der Annahme der Wellenförmigkeit des Lichts die Phänomene der Brechung und Reflexion zu erklären. Die Behauptung, Licht entstehe durch die Wellenbewegung des Aethers behält dabei durchaus hypothetischen Charakter und ist durch Experimente falsifizierbar.

In der Frühzeit der Elektrizitätslehre wurden solche phänomenalistischen Modelle schon verwendet. Cavendish¹ und Volta² beispielsweise sehen Parallelen zwischen dem Fließen der Elektrizität und dem von Flüssigkeiten. "Menge des elektrischen Fluidums" und "Elektrisierungsgrad" werden von Cavendish analog zu "Masse" und "Druck" eines fließenden elastischen Fluidums gesetzt. Beccaria glaubt eher das Verhalten der Luft als eine Analogie verwenden zu können und setzt Spannung mit der "Dichte des elektrischen Feuers" gleich.³ Für Poisson und Coulomb war die Hydrostatik ein Vorbild für die ausführliche mathematische Behandlung elektrostatischer Erscheinungen.

1) Teichmann 1974, 25ff.; McCormach 1967, 29f., 422, 440

2) Teichmann 1974, 42

3) Teichmann 1974, 54. Ebenso Singer 1819, 49f.: "Positive und negative El. sind der verdichteten und verdünnten Luft analog."

Aber gerade die Verwendung der Hydrostatik (Be-
rechnung der Kraft, die auf die Flüssigkeit an der
Oberfläche eines Sphäroids wirkt) als Leitvorstellung
für die mathematischen Ausarbeitungen der Elektrostatik
mag mit dazu beigetragen haben, daß die Hydrodynamik
nicht zum phänomenalistischen Modell für elektrodyna-
mische Erscheinungen wurde. Es war nämlich bis Davy 1821
ein allgemein anerkannter Grundsatz, daß die Elektrizität
sich auch bei Strömungsvorgängen nur an der Ober-
fläche der Ladungsträger befindet. Das Strömen von Flüs-
sigkeiten in Röhren konnte dazu dann nur ganz beschränkt
als Hilfsmittel dienen.¹ Dazu kommt noch die Tatsache,
daß die Hydrodynamik damals eine unterentwickelte Wissen-
schaft war und, mit Ausnahme von Euler, über eine Samm-
lung von Anleitungen zur Wasserbaukunst und zum Kanalbau
kaum hinausgekommen ist. So schreibt Flachsbart 1932:
"Diese Unklarheit [der Hydromechanik] die erst in jüngster
Zeit behoben werden konnte, ist Ausdruck der Ursache
- wie man will - für das Fehlen einer deutlichen Richt-
schnur in der Forschung."²

Gelegentlich finden sich Ansätze, die hydrodynamische
Modellvorstellungen benutzen aber nirgends konse-
quent ausführen. De Luc vergleicht 1810 eine galvanische
Säule mit einem Brunnen. Die Zahl der Plattenpaare wird
mit dem Durchmesser der Schicht verglichen, die das
Brunnenrohr durchquert; die Größe der Plattenoberfläche
wird proportional zur Größe der wassertragenden Schicht

1) Muncke 1829, 811

2) Flachsbart 1932, 35. Vgl. auch Neményi 1963

gesehen. Die naheliegende Analogie zwischen Spannung und Wasserdruck wird nicht ausgeführt.¹

Peter Barlow, in England, läßt sich, wie einst Cavendish, offenbar von der Newtonschen Hydrodynamik leiten. Er sieht im Elektrizitätsfluß nicht das Fließen einer Flüssigkeit, sondern den Durchgang von festen Stoffen durch eine Flüssigkeit - ganz im Sinne der Newtonschen Überlegungen über den Widerstand in wasserdurchflossenen Röhren.² Aber auch er versucht nicht, die Ähnlichkeit der beiden Bereiche systematisch auszubeuten.

Bei lediglich einem Autor fand ich den Versuch, die dualistische Theorie mit hydrodynamischen Vorstellungen zu verbinden. Erman glaubt, daß sich die beiden Elektrizitäten in einem stromdurchflossenen Leiter verteilen wie Quecksilber und Wasser, die jeweils von einer Seite durch ein Rohr gegeneinander geblasen werden. Damit erklärte er seine Beobachtung, auf die wir schon verwiesen haben, daß die positive Ladung eines Leitungsdrahts, der zwei Pole einer Voltaschen Säule verbindet, vom Pluspol bis zur Mitte hin auf Null abnimmt und ebenso die negative Ladung vom Minuspol. Der Leiter wird dadurch zum "diagonaloid magnetisierten Transversalmagneten", wie der Ausdruck lautete. Das hydrodynamische Modell wird aber nicht weiter ausgeführt.

Kästner³ unternimmt 1820 den interessanten Versuch, ein mechanisches Erklärungsmodell für den Stromfluß zu entwerfen. Er nimmt an, daß es nur ein elektrisches

1) Nicholsons Journal 26, 1810, zit. nach Ostwald 1896, 432ff.

3) Kästner 1820, §1242ff., Fischer 1823, 554f., vgl. Pfaff 1831, 219

2) Edinburgh Philosophical Journal 12, 1825, 105-114

Fluidum gibt, das jedoch in zwei verschiedenen Zuständen existiert: die negative Elektrizität besteht aus unbewegter bzw. langsam bewegter Materie und zwar von einer relativ geringen Menge. Der positiven Elektrizität wird neben großer Geschwindigkeit auch wesentlich mehr Stoff als der negativen zugeschrieben. Wird nun z.B. ein Stück Draht an einem Ende positiv geladen, so bleibt die negative Elektrizität an diesem Ende in Ruhe und am anderen Ende bildet sich positive Elektrizität. Im Modellbild erhält das folgende Erklärung: Die negative Elektrizität gleicht einer Reihe von nebeneinander hängenden und sich berührenden Kugeln, die von anderen Kugeln angestoßen werden. Die stoßenden Kugeln, sowie die infolge des Stoßes abprallenden, repräsentieren die positive Elektrizität. Mit dieser Hypothese glaubt Kästner die meisten elektrischen Erscheinungen erklären zu können. Besonders die Entstehung der Elektrizität durch Reibung erhalte dadurch eine sehr einfache und natürliche Erklärung.

Auch Pohl will die Fortpflanzung der Elektrizitätserregung in Leitern nach diesem Bild verstanden wissen: "Das bekannte Experiment, worin ein Stoß auf das eine Ende einer Reihe dicht neben einander liegender elastischer Kugeln diese alle in Ruhe läßt bis auf die äußerste am andern Ende, welche fortgetrieben wird, ist ein äußerliches Bild für die Thätigkeit der electrischen Leiter."¹

1) Pohl 1829, 436

Vereinzelte finden sich auch schon Andeutungen, die die Fortleitung der Elektrizität analog zur Wärmeleitung sehen. So schreibt ^{Pfaff}, daß es keine absolute Messung der Elektrizität geben kann, solange die Elektrizität "noch nicht für sich dargestellt ist. ... Vielmehr setzt man sie der Stärke ihrer Wirkungen proportional, wie dieses auch bei der Ausmessung der Wärme der Fall ist."¹ Auch sieht er die Elektrizitätszerstreuung an die Luft ähnlich der Wärmeleitung von Flüssigkeiten.² Und Förstemann schließlich vergleicht die Elektrizitätsleitung durch Flüssigkeiten mit der Wärmeleitung: "Überhaupt läßt sich die Leitung der Elektrizität durch Flüssigkeiten einigermaßen mit der Leitung der Wärme durch dieselben vergleichen; denn wie bei letzterer zwei Arten der Leitung, eine durch Mittheilung und eine durch Bewegung unterschieden werden muß, so läßt sich dies auch für die Leitung der Elektrizität behaupten, nur daß sich hier die Bewegung nicht sowohl auf die einzelnen Theilchen der Flüssigkeit, sondern auf die Bestandtheile derselben bezieht, und also zugleich Bewegung und Zersetzung ist. Diese Ähnlichkeit wird dadurch noch vermehrt, daß sowohl für die Wärme als für Elektrizität die Leitung durch unmittelbare Mittheilung in flüssigen Körpern weit geringer ist, als die Leitung durch Bewegung."³

Zusammenfassend können wir sagen, daß phänomenalistische Hilfsmodelle des Stromflusses eine untergeordnete

1) Pfaff 1827, 681

2) Pfaff 1827, 278

3) Kastners Archiv 4, 1825, 116. Vgl. auch Erman in Gilb. Ann. 64, 1820, 50. Es wäre möglich, daß Ohm sich durch diese Bemerkungen zu seiner "Galvanischen Kette" hat inspirieren lassen.

in der Argumentation der deutschen Physiker spielen; jedenfalls finden sich wenig Überlegungen, die explizit und ausführlich an solche Modelle anknüpfen.

Die Literatur, die phänomenalistische Modelle mathematisch ausarbeitet, wie es in Frankreich der Fall war, wird kaum rezipiert. Es gibt zwar eine Menge von Büchern, die aus dem Französischen übersetzt werden, wie z.B. von Biot und Pouillet, jedoch sind das meist populärere Werke, die keine große mathematische Vorbildung nötig machen. Auch die meisten deutschen Physik-lehrbücher der Zeit sind geschrieben: "zur Belehrung derer, denen es an mathematischen Vorkenntnissen fehlt."¹ Eine Ausnahme bildet Andreas Baumgartners "Die Naturlehre nach ihrem gegenwärtigen Zustande mit Rücksicht auf mathematische Begründung", in deren Supplementband 1831 die angewandte Mathematik der Franzosen (und übrigens auch Ohms Theorie) rezipiert wird², sowie ein Artikel von Kämtz in Ersch und Grubers Enzyklopädie, über Elektrizität.³

Aus diesen Tatsachen läßt sich aber nicht unbedingt schließen, daß die Physiker der damaligen Zeit insgesamt schlechte Mathematiker gewesen wären. H.W.Brandes war Professor der Mathematik in Breslau, beschäftigte sich viel mit theoretischer Astronomie und legt 1806 eine Übersetzung und Bearbeitung einer Eulerschen Schrift vor: "Die Gesetze des Gleichgewichts und der Bewegung flüssi-

1) So Brandes 1830.

2) Baumgartner 1831. Merz 1965, 44: "As late as 1860 hardly any textbook existed in Germany on the theoretical and mathematical portions of physics. The second volume of 'Baumgartner' was a miserable compilation. Beer's 'Höhere Optik' was the first important work of this kind."

3) Kämtz 1840

ger Körper". Selbst G.F.Pohl war seit 1820 Mathematikprofessor an einem Berliner Gymnasium. Auf der anderen Seite ist klar, daß die mathematische Ausbildung zur damaligen Zeit noch sehr unterentwickelt war und sich die meisten Physiker ihre Kenntnisse noch autodidaktisch aneignen mußten.¹

3. Ohms Theorie als ein Anfang theoretischer Physik in Deutschland

Georg Simon Ohm lebte von 1789 - 1854. Mit seiner Schrift von 1827 "Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet" beginnt sich eine Wende in der Elektrizitätslehre, und besonders in der Deutschlands, abzuzeichnen. Das Vorbild für Ohms Theorie war die 1822 erschienene "Théorie analytique de la Chaleur" von Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830), in der eine neue Methode der Formulierung und Lösung von physikalischen und mathematischen Problemen mithilfe von partiellen Differentialgleichungen und trigonometrischen Reihenentwicklungen ("Fourier-Analyse") dargelegt wurde. Ohm gab eine Theorie der Elektrizitätsverbreitung in Analogie zu Fouriers Theorie der Wärmeleitung. Damit ist nicht nur eine völlig neuartige Behandlung der elektrischen Strömung gegeben, sondern auch eine für die Elektrizitätslehre in Deutschland² (ja m.E. die

-
- 1) vgl. dazu Lorey 1916, bes. S. 32, wo der Werdegang des Mathematikprofessors Martin Ohm, des Bruders von G.S.Ohm, als "typischer Bildungsgang eines deutschen Mathematikers aus dem Anfang des 19.Jhdts." beschrieben
 - 2) Ein in vieler Hinsicht paralleler Fall trat ^{wird.} auch in England ein mit George Greens fundamentalem Aufsatz zur Potentialtheorie "An Essay on the application of mathematical Analysis to Theories of Electricity and Magnetisme", Nottingham 1828

gesamte Physik in Deutschland) alternative Art einer physikalischen Theorienbildung vorgestellt.

Die Reaktion auf Ohms Schrift war vielfältig. Sie reichte von totaler Ignorierung und Ablehnung bis zu begeisterter Zustimmung. Die Nichtanerkennung Ohms ist eines der berühmtesten Beispiele aus der Wissenschaftsgeschichte von Widerstand gegen Neuerungen. Bevor jedoch die wichtigsten Gründe dafür näher untersucht werden, will ich zuerst eine kurze Darstellung von Ohms Theorie geben.

3.1 Ohms Theorie der Elektrizitätsverbreitung

1825 veröffentlicht Ohm ein logarithmisches Gesetz über den "Kraftverlust", den ein variabler Schließungsdraht erleidet, wenn man ihn mit der elektromagnetischen Kraft eines dicken und sehr kurzen Standarddrahtes vergleicht.¹ Die Kraft dieses Standards heiße die Normalkraft $\mathcal{X}$ und die Kraft des Schließungsdrahtes sei k . Dann findet Ohm folgende Formel:

$$\frac{\mathcal{X} - k}{\mathcal{X}} =: v = m \cdot \log \left(1 + \frac{\mathcal{X}}{a} \right),$$

wobei v den Kraftverlust und x die Länge des veränderlichen Leiters bedeutet. a ist von der Länge des unveränderlichen Leiters abhängig und m ist eine "Funktion der Normalkraft, von der Dicke des Leiters, von dem Werthe a und, wie ich Ursache zu glauben habe, von der elektrischen Spannung der Kraft."²

Dieses Gesetz hat, wenn man es modern interpretiert, Gültigkeit für Stromkreise, deren Innenwiderstand sehr hoch ist im Vergleich zum sehr kleinen Außenwiderstand.³ Durch Umformung der rechten Seite erhalten wir:

$$m \cdot \log(1 + x/a) = m \cdot (\log(a+x) - \log a)$$

Für $0 < x < a$:

$$\log(a + x) = \log a + \frac{x}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{x}{a}\right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{x}{a}\right)^3 \dots$$

Bei Vernachlässigung höherer Potenzen ergibt sich:

$$(\approx) \quad m \log(1 + x/a) = m \frac{x}{a}.$$

Nun wird $\mathcal{X}$ interpretiert als Stromstärke $I_n = U/R$, wobei der Außenwiderstand eines eingeschalteten Standarddrahtes

1) Ohm 1892,1-8. Diese Theorie wird unten, S.237, im Prädiikat P5 logisch rekonstruiert

2) Ohm 1892,6

3) Für das folgende vgl. Schagrin 1963,542f.

vernachlässigbar klein ist. K wird interpretiert als $I = U/(R+r)$ bei Einschaltung des Testdrahtes mit Widerstand r . Wenn man nun r als x interpretiert und R als a , dann ist $I_n - I = U \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{a+x} \right)$. Für $r \ll R$ bzw. $x \ll a$ gilt also:

$$I_n - I \approx U x/a^2, \text{ d.h.}$$

$$\frac{I_n - I}{I_n} \approx \frac{U}{I_n \cdot a} \cdot \frac{x}{a}$$

was dasselbe ist wie (3), wenn man m als $m(U, I_n, a)$ interpretiert.

Die Konzeption des Kraftverlustes eines Leiters ist noch gemäß der Coulombschen Konzeption geprägt. Die Vorstellung von der "Reibungskraft" erscheint noch in dem Ausdruck $I_n - I$.

1826 erscheint in Schweiggers Journal die "Bestimmung des Gesetzes, nach welchem Metalle Contactelektricität leiten, nebst einem Entwurfe zu einer Theorie des Voltaischen Apparates und des Schweiggerschen Multiplikators".¹ Ohm schreibt darin über Becquerel und Barlow, von denen etwa zur gleichen Zeit mit dem ersten Artikel von Ohm Versuche zur Elektrizitätsleitung veröffentlicht wurden:

Ihre Arbeiten, so weit sie mir bekannt geworden sind, habe ich bei meinen späteren Versuchen stets berücksichtigt und bin so zu der Überzeugung gelangt, daß weder die von diesen Naturforschern über die Länge des Leiters ausgesprochenen Gesetze, noch das von mir angekündigte, allgemein und frei von der Einmischung solcher Kräfte seien, die keineswegs zu der Frage, um die es sich handelt, gehören. Dagegen hoffe ich jetzt im Stande zu sein, die Parteien mit einander auszusöhnen und ein Gesetz aufzustellen, welches sich sowohl durch vollkommene Übereinstimmung mit den nach allen Grenzen

1) Ohm 1892, 14-36. Diese Theorie wird unten S.238 als Prädikat P6 formal rekonstruiert

hin fortgesetzten Versuchen, als auch insbesondere durch die Einheit, welche es über alle den elektrischen Strom angehende Erfahrungen verbreitet, eine Einheit, wie sie nur im Gefolge der Wahrheit zu erblicken ist, als das reine Gesetz der Natur verkündigt.¹

Im folgenden beschreibt dann Ohm Versuche, bei denen er verschieden lange Drähte desselben Metalls in einen thermoelektrischen Stromkreis bringt. Die dabei gefundenen Zahlen, so Ohm, "lassen sich sehr genügend durch die Gleichung $X = \frac{a}{b + x}$ darstellen, wobei X die Stärke der magnetischen Wirkung auf den Leiter, dessen Länge x ist, a und b aber constante, von der erregenden Kraft und dem Leitungswiderstande der übrigen Theile der Kette abhängige Größen bezeichnen."² Für seine Versuche benutzte Ohm eine thermoelektrische Stromquelle, um das "beständige Wogen der Kraft", die Inkonstanz der Wirkung einer Voltaschen Batterie auszuschließen. Erst ab ca. 1836 wurden durch die Bemühungen von Daniell, Grove und Becquerel konstante galvanische Batterien geschaffen.

X wird mit einem, der Coulombschen Drehwaage nachgebildeten Torsionsamperemeter gemessen, um den Eigenwiderstand eines gewöhnlichen Multiplikators nicht berücksichtigen zu müssen.

In allen mir bekannten geschichtlichen Darstellungen wird dieses Gesetz durchweg als erstmalige Formulierung des "Ohmschen Gesetzes" eingeschätzt, d.h. es wird in moderner Schreibweise als $I = \frac{U}{R_a + R_i}$ ausgedrückt. Diese Interpretation ist nur zulässig, wenn man den Ausdruck "erregende Kraft", den Ohm für a gebraucht, mit dem

1) Ohm 1892, 14f.

2) Ohm 1892, 25

modernen Begriff der "elektromotorischen Kraft" gleichsetzt. In Ohms Arbeit findet sich jedoch nirgends eine Definition des Begriffs der erregenden Kraft, noch wird irgendwo beschrieben, ob bzw. wie a gemessen wird. Es ist deshalb wesentlich wahrscheinlicher, daß Ohm unter "Kraft" dasselbe versteht wie in seiner Arbeit vom Vorjahr, nämlich die Wirkung eines Stromes auf die Magnetnadel. Dies wird noch durch folgende Beobachtungen gestützt: Ohm mißt das "beständige Wogen der Kraft", also die Inkonstanz der voltaischen Säule nicht mit einem Elektroskop, sondern wiederum durch Einschaltung eines kurzen dicken Standarddrahtes. Um dieses Wogen zu vermeiden, benutzt er dann eine (einzige) thermoelektrische Stromquelle, die einigermaßen konstanten Strom liefert. Die Formulierung des Textes legt nahe, daß Ohm die Werte für a und b errechnet hat aus jeweils zwei Versuchen einer Versuchsreihe, während der die Länge des Drahtes x variiert wurde, und dann für die übrigen gemessenen Werte eine Übereinstimmung mit den errechneten Werten erhält.

Wenn wir nun diese Lesart zugrundelegen, daß Ohm unter der erregenden Kraft a der Kette nicht die elektromotorische Kraft, sondern die "Normalkraft" im Sinne seines Artikels von 1825 versteht, dann ergibt sich folgende moderne Interpretation:

Sei $I_n = U / R$ die "erregende Kraft" .

Dann heißt $X = \frac{a}{b + x}$ modern ausgedrückt:

$$I = \frac{I_n}{R + r} .$$

Richtig müßte die Formel nach Ohms Gesetz jedoch

lauten: $I = R \cdot \frac{I_n}{R + r}$, wenn man für $U = I_n \cdot R$ setzt.

Da Ohm nur eine einzige Stromquelle benutzt hat, ist ihm die Notwendigkeit für einen Proportionalitätsfaktor R nicht deutlich geworden.

Alle übrigen Erklärungsversuche, die Ohm mit seiner Formel gibt, sind mit dieser Lesart verträglich. Ohm erklärt z.B. warum die "hydroelektrischen Ketten" (Stromkreise mit Voltaschen Säulen) sich so sehr von den thermoelektrischen unterscheiden und stellt die Regeln auf, mit deren Hilfe man voraussagen kann, wann ein Multiplikator die elektromagnetische Wirkung vergrößert und wann nicht.

Wenn die hier vorgelegte Lesart richtig ist, dann läßt sich noch deutlicher nachzeichnen, wie sich Ohm allmählich vom Coulombschen Vorbild loslöste. In der Arbeit von 1825 taucht noch das "Reibungsmodell" auf und der Widerstand als Differenz zweier Kräfte. In der eben besprochenen Arbeit ergibt sich der Widerstand ebenfalls durch Vergleich zweier Kräfte, aber es wird nicht mehr die Differenz der Kräfte wie bei der mechanischen Reibung als maßgeblich angesehen.

In einer weiteren Arbeit von 1826, dem "Versuch einer Theorie der durch galvanische Kräfte hervorgebrachten elektroskopischen Erscheinungen" ¹ wird nun der entscheidende letzte Schritt getan: Aus der Tatsache, daß sich die "erregende Kraft" (im alten Sinne) in der thermoelektrischen Quelle als proportional zum Temperaturunterschied der thermoelektrischen Elemente herausge-

1) Ohm 1822, 37-54. Diese Theorie wird unten S. 239 als Prädikat P7 formalisiert.

stellt hat¹, und daß dieser Temperaturunterschied wiederum proportional ist zur Differenz der elektrischen Spannung, wird a nun nicht mehr als "erregende Kraft" oder "Normalkraft" eines kurzen dicken Drahtes definiert, sondern gleich als "Spannung", wie Ohm nun sagt. Daß Ohm erst mit dieser Arbeit Messungen mit dem Elektrometer als relevant für die Gesetze der Kette heranzieht, geht aus seinen Bemerkungen hervor, wenn er die Berücksichtigung der Spannung der Kette als einen Weg bezeichnet, der seinen bisherigen Bemühungen entgegengesetzt war. Seit der letzten Veröffentlichung, schreibt Ohm,

bin ich so glücklich gewesen, auf entgegengesetztem Wege aus der allgemein anerkannten und in dieser Region obersten Thatsache, die wir mit dem Namen der elektrischen Spannung zwischen verschiedenartigen Körpern zu bezeichnen pflegen [unter dieser Thatsache versteht Ohm die Kontakttheorie Voltas] mit Hülfe der Mathematik, dem wundervollen Gedankenmedium, zwei den inneren Zusammenhang aller bei der galvanischen Kette thätig einwirkenden Elemente aufschließenden Gesetze zu entdecken, die bestimmt und doch so einfach alle früher gefundenen wiedergeben und außerdem, was jene noch zu wünschen übrig ließen, in sich zu fassen scheinen.²

Die beiden Gesetze beschreibt Ohm so:

Es lassen sich die beiden, auf jede galvanische Kette gewöhnlicher Art anwendbaren Gesetze durch folgende zwei Gleichungen kurz so aussprechen:

$$X = k w \frac{a}{l} \quad (a)$$

$$u - c = \pm \frac{x}{l} a, \quad (b)$$

wobei k das Leitungsvermögen, l die Länge, w den Querschnitt eines homogenen prismatischen Leiters,

1) Ohm 1892, 26

2) ibid., 37

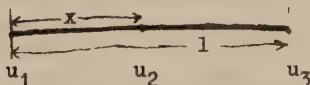
a die an seinen Enden hervortretende elektrische Spannung, und x die Länge eines Theils des Leiters bezeichnet, der von einem in dem Leiter unveränderlich, übrigens willkürlich angenommenen Querschnitte, der zum Anfangspunkte der Abscissen gewählt worden ist, bis zu einem innerhalb des Leiters veränderlich gedachten Querschnitte reicht; ferner stellt X die auf der ganzen Länge des Leiters unveränderlich sich erhaltende Stärke des elektrischen Stromes und u die Intensität der auf das Elektrometer wirkenden, an der durch x bezeichneten Stelle befindlichen und mit ihr veränderlichen Elektricität vor; endlich ist c eine durch gegebene Umstände noch zu bestimmende, von x unabhängige Größe. Das doppelte Zeichen in der Gleichung (b) bestimmt sich danach, ob die Richtung der Abscissen von mehr - thätigen Stellen nach mehr + thätigen geht, oder ob umgekehrt.

Das Gesetz (a) ist nun das Ohmsche Gesetz in seiner immer noch gültigen Form für stromdurchflossene Leiterstücke.

(b) läßt sich, wie folgt, modern ausdrücken:

Wir interpretieren den Leiter der Länge l als einen Stromkreis, dem eine Stromquelle mit der elektromot. Kraft $E = u_1 - u_3$ und dem Innenwiderstand Null eingepreßt ist.

Dann setzt sich diese Spannung zusammen als Summe der Potentialdifferenzen, die sich an den Widerständen des Stromkreises bilden. Stellen wir uns den Stromkreis wie folgt in zwei Widerstände geteilt vor, x und $l-x$:



wobei u die Potentiale seien. Dann gilt nach (a):

$$I \cdot x = u_1 - u_2 \text{ und } I \cdot l = u_1 - u_3 = a$$

$$\text{d.h. } u_1 - u_2 = \pm \frac{x}{l} a.$$

Im Jahre 1827 erscheint schließlich Ohms Monographie über "Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet".

Im ersten Drittel gibt Ohm eine etwas populäre Übersicht, um dann im verbleibenden Teil systematischer und strenger

zu verfahren. Er setzt sich das Ziel, eine geschlossene Theorie für die Kontaktelektrizität aufzustellen, die alle Fälle der eindimensionalen Elektrizitätsverbreitung behandelt. Er geht dabei von drei "Grundgesetzen" aus, die in verschiedensten Ausdrücken angeführt werden, so daß man nicht immer weiß, welches nun die verbindliche Form des Gesetzes ist. Ich versuche, die wichtigsten Momente herauszukristallisieren.¹

Das erste Axiom behandelt die Art der Elektrizitätsverbreitung in einem Leitungsdraht, nach einer Dimension. Dazu wird erst der Begriff der "elektroskopischen Kraft" festgesetzt. Das ist die Kraft eines Körpers, "womit das Elektroskop von dem Körper abgestoßen oder angezogen wird"². Als nächstes wird definiert, was unter "Leitungsgüte" oder "Stärke der Leitung zwischen zwei Orten" zu verstehen ist. Es ist dies "das Produkt aus der Menge dessen, was in einer bestimmten Zeit von einem Orte zum anderen übergeführt wird, in die Entfernung" der beiden Orte von einander; also $k = (q/t) \cdot s$, wenn k die Leitungsgüte, q die in der Zeit t transportierte Elektrizitätsmenge und s die Entfernung der beiden Körper voneinander ist. Ohm definiert dann:

Wir werden ... die Summe der elektroskopischen Äußerungen - worunter wir also das Produkt aus der Kraft in die Größe des Raumes, worüber sie verbreitet ist, zu verstehen haben, im Falle daß an allen Stellen dieses Raumes einerlei Kraft sich befindet - Elektrizitätsmenge nennen, ohne daß wir dadurch irgend etwas über die materielle Beschaffenheit der Elektrizität festzusetzen beabsichtigen.³

1) indem ich mich eng an Pfaff 1828, Kämtz 1828, Caneva 1974
2) Ohm 1892, 105 halte

3) Ohm 1892, 38

Das der "Galvanischen Kette" entsprechende Prädikat wird unten, S. 240/241 als P8 & P9 formalisiert.

d.h. mit anderen Worten: Elektrizitätsmenge = elektroskopische Kraft mal Rauminhalt, oder: elektroskopische Kraft = Elektrizitätsmenge pro Rauminhalt, also Elektrizitätsdichte, eine Definition, die den Zeitgenossen Ohms große Schwierigkeiten bereiten sollte.

Nun geht Ohm davon aus, daß die Änderung der Elektrizitätsmenge Q , die beide s von einander entfernten Körper pro Zeit erfahren, proportional ist ^{der} zu dieser Zeit vorhandenen Differenz der elektroskopischen Kräfte der beiden Körper. Zusammen mit der Definition der Leitungsgüte erhält Ohm daraus schließlich als erstes Axiom:

$$(I) \quad dQ = \frac{k(u-u') dt}{s}$$

wobei u und u' die elektroskopischen Kräfte der Körperelemente im Draht sind, deren Entfernung von einander s beträgt.

Ohm sagt selbst, dieses Gesetz sei "seiner Natur nach wenigstens zum Theile theoretisch"², d.h. nicht auf empirischem Wege gewonnen. Seine Richtigkeit müsse sich erst durch die Bewährung der daraus gezogenen Folgerungen beweisen, und im übrigen sei diese Formel gerechtfertigt durch ihre Allgemeinheit, Einfachheit und Klarheit "als auch durch das Licht, welches [sie] ... auf den Sinn der früheren Methoden wirft."³ Diese Formel ist ganz analog der Formel für die Wärmeströmung in Fouriers Wärmelehre. Der Wärmeübergang zwischen zwei Körperelementen ist dort proportional dem Temperaturunterschied ∂v . Die Formel

1) Ohm 1892,62

2) Ohm 1892,63

für die Wärmeströmung in einer Dimension lautet bei

Fourier:¹ $q_x = -k\omega dt \frac{\partial v}{\partial x}$

(k ist die spezifische "innere Leitungsfähigkeit" der fraglichen Substanz, ω der Querschnitt, $v = F(x, t)$ und x der Abstand.)

In einem zweiten Axiom, das Ohm der Vollständigkeit halber anführt, wird, getreu einem Ergebnis von Coulomb, die Art der Elektrizitätszerstreuung in das den Leiter umgebende Medium ermittelt. Die während der Zeit dt von einem Leiterstück dx mit Umfang c entweichende Elektrizitätsmenge ist

(II) $dq = b \cdot c \cdot dx \cdot u \cdot dt$

wobei u die an der Stelle dx wirksame elektroskopische Kraft und b eine vom Zustand der Luft abhängige Konstante ist. Ohm führt (II) an, um die Analogie zu Fouriers Behandlung der Wärmeleitung vollständig zu machen. Für die weitere Diskussion nimmt er später an, daß die Leiter so gut isoliert sind, daß die an die Luft entweichende Elektrizitätsmenge vernachlässigbar klein ist.

Das dritte Axiom betrifft die Art des Hervortretens der Elektrizität an der Berührungsstelle zweier heterogener Körper, d.h. zweier verschiedener Metallstücke. Dazu definiert Ohm den Begriff der Spannung als die Differenz der elektroskopischen Kräfte an einer Erregungsstelle des Stromkreises; d.h. an dieser Stelle, wo sich die beiden Metalle berühren. Ohm bemerkt dazu:

Die elektrische Kraft eines jeden homogenen Theils der Kette ändert sich seiner ganzen Länge nach stetig und auf gleiche Strecken stets um gleich viel;

1) Fourier 1884, 58

aber da, wo er aufhört und ein anderer anfängt, ändert sie sich plötzlich um die ganze, an der Stelle befindliche Spannung.¹

Wenn also u die elektroskopische Kraft des einen Metalls an der Berührungsstelle und u' die des andern an derselben Stelle bedeutet, dann kann man die von Ohm in diesem Grundsatz angenommene kontakttheoretische Hypothese in folgendem Axiom ausdrücken:

$$(III) \quad a = u - u' = \text{const.}$$

wobei a die Spannung bedeutet.

Aus den Formeln (I) und (III) leitet Ohm nun das "Ohmsche Gesetz" her. Der Gang der Ableitung sei kurz skizziert:

Zunächst wendet Ohm (I) auf den infinitesimalen Fall an. Seien M' , M , M'' infinitesimale nebeneinanderliegende Scheiben eines Leiters mit $x+dx$, x , und $x-dx$ als ihre Abszissen, dann erhalten wir für die Menge der Elektrizität von M' nach M und M'' nach M (hier geht die Voraussetzung der dualistischen These ein): w sei der Drahtquerschnitt.

$$(1) \quad \frac{kw(u' - u)dt}{dx} \quad \text{und} \quad \frac{kw(u'' - u)dt}{dx}$$

wobei $u' = u'(t, x+dx)$, $u'' = u''(t, x-dx)$, $u = u(t, x)$.

Für den Gesamtzuwachs an Elektrizität ergibt das

$$(2) \quad \frac{kw(u' + u'' - 2u)dt}{dx}$$

Mit Hilfe einer Taylorreihenentwicklung für u' und u'' erhalten wir

$$(3) \quad kw \frac{d^2u}{dx^2} dx dt$$

Jede Formel von (1) kann aber auch geschrieben werden als $kw \frac{du}{dx} dt$. Ohm definiert nun die "Größe des elektri-

schen Stromes" als die Menge, die durch den Querschnitt eines Leiters in der Zeiteinheit fließt:

$$(4) S = kw \frac{du}{dx}$$

Daraus ergibt sich die Kontinuitätsbedingung für zwei verschiedene aneinanderstoßende Leiter:

$$(5) kw \frac{du}{dx} = k' w' \frac{du'}{dx}$$

Subtrahiert man (II) von (3), dann ergibt sich die totale Änderung der Elektrizitätsmenge eines Leiters.

Aber das ist nach der Definition der Elektrizitätsquantität:

$$(6) w \frac{du}{dt} dx dt.$$

Dies gilt jedoch nur unter der Voraussetzung, daß gleiche Änderungen der elektroskopischen Kraft gleichen Änderungen der Elektrizitätsmenge entsprechen. Wenn nicht, muß die Größe (6) - analog zum Wärmekoeffizienten bei der Wärmeströmung - um einen Faktor γ multipliziert werden. Über diese Voraussetzung schreibt Ohm:

"Die Erfahrung hat über diese aus dem Verhalten der Wärme zu den Körpern entlehnte Muthmaßung noch nicht entschieden."¹ Aus diesem Grunde rechnet Ohm alles mit γ durch. Aus (II) - (3), gleichgesetzt mit (6) und beide Seiten dividiert durch $w dx dt$ ergibt sich:

$$(7) \gamma \frac{du}{dt} = k \frac{d^2 u}{dx^2} - \frac{bc}{w} u.$$

(Bei Fourier: $\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{k}{cD} \nabla^2 v$ für drei Dimensionen,

wobei C spez. Wärmekapazität, D Dichtigkeit der Substanz.²)

1) Ohm 1892, 121

2) Fourier 1884, 75

Falls die Abgabe der Elektrizitätsmenge an das umgebende Medium zu vernachlässigen ist, also $b = 0$ gesetzt werden kann, und falls der Strom in der Kette stationär ist, d.h.

$$\frac{du}{dt} = 0$$

dann ergibt sich aus (7):

$$\frac{d^2u}{dx^2} = 0$$

Daraus durch Integration:

$$(8) \quad u = fx + c$$

Wenn man nun einen Stromkreis, der aus einem einzigen Leiter mit Länge l gebildet ist, dessen Enden $x = 0$ und $x = l$ sich in einer einzigen Erregungsstelle berühren, dann gilt:

$$(9) \quad u_{x=l} - u_{x=0} = f \cdot l - f \cdot 0 = a$$

a ist die Spannung zwischen 0 und l . Daher $f = \frac{a}{l}$ und für diesen einfachen Stromkreis

$$(10) \quad u = \frac{a}{l}x + c$$

Ohm verallgemeinert diese Formel (die Herleitung wird hier übergangen), indem er den Begriff der "reduzierten Länge eines Leiters" einführt. Man erhält diese Länge, indem man ausrechnet, wie lange ein Standarddraht sein müßte, um einem anderen Draht in der Leitungsgüte äquivalent zu sein, der aus beliebigem Material besteht mit beliebigem k , w , l . Die allgemeine Formel lautet:

$$(11) \quad U = \frac{A}{L} y - \sigma + c$$

L ist die Summe der reduzierten Längen aller benützten Leiter, y die reduzierte Abszisse und σ ist die Summe aller Erregungsstellen zwischen 0 und y . Wie Ohm selbst ^{später} einräumt, stammt die erste experimentelle Bestätigung für diese Formel von Kohlrausch.¹

Aus (6) und (11) ergibt sich schließlich:

$$(12) \quad S = kw \frac{du}{dy} \cdot \frac{dy}{dx} = kw \frac{A}{L} \cdot \frac{dy}{dx}$$

Ohm zeigt dann noch, daß $\frac{dy}{dx} = \frac{1}{kw}$. Daher

$$(13) \quad S = \frac{A}{L}$$

d.h. der Strom in einer galvanischen Kette ist konstant an allen Querschnitten und gleich der Summe aller Spannungen, dividiert durch die Summe aller reduzierten Längen.

Ohm wendet dann seine Ergebnisse an auf die Theorie des Multiplikators und Kondensators. Außerdem erklärt er die Gesetzmäßigkeiten der Stromverzweigung. In einem

1) Ohm 1854, 345; Kohlrausch: Pogg. Ann. 78, 1849, 1-21 = "Die elektroskopischen Eigenschaften der geschlossenen galvanischen Kette".

Anhang versucht er, auch die chemischen Wirkungen des Stromkreises mathematisch zu behandeln. In einer Ableitung wird die Größe der Kraft ermittelt, womit eine infinitesimale Scheibe aus dem Stromkreis sich längs der Achse des Leiters hinzubewegen strebt. Sie lautet:

$$(14) \quad 2 \frac{x'}{x} x \omega \nu \frac{d\nu}{dx}$$

wobei x' das "Einwirkungsmoment" zwischen zwei Orten ist, das gleich dem Produkt der zwischen beiden sich erzeugenden Kraftäußerung und ihrer mittleren Entfernung ist.

Nach (4) erhalten wir: $2 \frac{x'}{x} \nu S$

Weiter macht Ohm die Annahme, daß jede kleine Scheibe eines Stromkreisstücks aus zwei verschiedenen Bestandteilen zusammengesetzt ist, die verschiedene Masse haben. Unter gebundener Elektrizität versteht Ohm nun diejenige Elektrizität, die dafür aufgewendet wird, daß die zwei Bestandteile (mittels Anziehungskraft) zusammen bleiben. Die freie Elektrizität ist dann diejenige, die für diesen Zusammenhalt eines Stoffes nicht benötigt wird. Daraus findet nun Ohm einen Ausdruck für die zersetzende Kraft der Elektrizität in der Kette, "durch welchen wir erfahren, daß die zersetzende Kraft der Kette dem elektrischen Strome und außerdem einem von der chemischen Beschaffenheit einer jeden Stelle der Kette abhängigen Koeffizienten proportional ist."¹ Mit Hilfe dieser Bestimmungen versucht Ohm, alle chemischen Erscheinungen in einem galvanischen Stromkreis zu erklären. Aber er ist sich dabei bewußt, daß gerade dieser Anhang über

1) Ohm 1892, 171. In diesem Anhang über die chemischen Erscheinungen scheint schon eine Vorahnung des ersten Faradayschen Gesetzes zu liegen.

die chemischen Wirkungen am problematischsten ist, da ihm die empirische Basis noch weitgehend fehle. Er schreibt, daß es bisher noch kein Gesetz gebe, das die Leitfähigkeit und die "bei der Berührung" erzeugte Spannung einer Flüssigkeitsmischung zu errechnen erlaubt, wenn Leitfähigkeit und Spannung der einzelnen Komponenten und das Mischungsverhältnis bekannt sind: "Aus diesem Grunde haben wir uns bewogen gefunden, den Mangel an Erfahrung durch Hypothesen zuzudecken."¹ Es liege eine vollständige Grundlage zu einer Theorie der chemischen Erscheinungen vor, "deren Ausbau nur auf eine neue Zufuhr durch Versuche wartet, um nicht durch das Aufeinanderhäufen einer Menge problematischer Materialien sich in eine philosophische Leere zu verirren."²

Vergleicht man diese theoretischen Ansätze Ohms mit denjenigen, die vor ihm zur Lösung des Problems der galvanischen Wirkung als gültig akzeptiert waren, so muß man feststellen, daß Ohm nicht mehr im Rahmen der alten Begrifflichkeit zu den bekannten Gesetzen einfach ein Neues hinzuaddiert hat, sondern daß er die alten Begriffe durch neue ersetzte. So entfernte er sich mit seinem Begriff der Quantität vom üblichen Begriff und seiner Meßmethode.

Bisher hatte man, wie schon öfters erwähnt, die Quantität im geschlossenen Stromkreis mit dem Multiplikator gemessen. Die Bezugnahme Ohms auf das Elektroskop als Quantitätsmaß mußte ganz irrtümlich erscheinen. Außer-

1) Ohm 1892, 177

2) ibid. 184

dem mußte es der überkommenen Elektrizitätslehre unverstänlich sein, was die elektroskopische Kraft eines geschlossenen Leiters anderes bedeuten solle, als freie statische Elektrizität, die mit der strömenden Elektrizität nichts zu tun hat. Die elektroskopischen Kräfte der beiden Pole einer offenen Säule haben zwar einen Einfluß darauf, ob überhaupt Elektrizität durch einen Leiter fließt, aber nicht auf die Menge als solche. Für den Atomisten hängt die Menge z.B. auch noch von der Leitfähigkeit des Zwischenleiters in der Säule ab. Die Spannung kann nach dieser Ansicht u.U. auch variiert werden, ohne daß sich die Quantität oder Leitfähigkeit ändert.

Auch der von Ohm eingeführte Begriff der Leitfähigkeit unterschied sich von dem vor ihm üblichen. Nach der alten Auffassung ist die Leitungsfähigkeit nicht nur abhängig von der Länge, dem Querschnitt und Material des Leiters, sondern auch von der Spannung der Elektrizitätsquelle! Je geringer die Spannung, desto größer der Widerstand, den ein Leiter der Elektrizität entgegensetzt. In diesem Sinne wird Barlow von Schweigger vorgeworfen, er habe fälschlicher weise angenommen, daß für "schwächere und stärkere Elektrizität dasselbe Leitungsgesetz gelte"¹, d.h. die Leitfähigkeit eines Leiters konstant ist. Diese Ansicht, wie wir sahen (s.oben S.62) leitet sich direkt von der Coulombschen her.

Neu an Ohms Theorie mußte auch die Art der Theoretisierung erscheinen. Anstatt ein qualitatives anschauliches Vorstellungsmodell vom Strömungsvorgang der Elek-

1) Schweigg.Journ. 44, 1825, 362

trizität zu liefern, setzt Ohm die Elektrizitätsströmung auf abstrakte Weise analog zur Wärmeströmung. Die mathematische Fassung spielt für die Wärmelehre und damit für Ohms Theorie eine unabdingbare Rolle, wie sich Fourier ausdrückt: "Die Wirkungen der Wärme sind unveränderlichen Gesetzen unterworfen, die man ohne Hilfe der mathematischen Analysis nicht aufzustellen vermag."¹ Und Ohm selbst sagt dazu: "jede auf Thatsachen gebaute Theorie einer Klasse von Naturerscheinungen, die in der Form ihrer Darstellung nicht die mathematische Ausführlichkeit erträgt, ist unvollkommen."²

Diese neue Art der Theoretisierung entleert, sozusagen, den behandelten Bereich seiner Anschaulichkeit. Fourier hat das für seine Theorie sehr deutlich gesehen. In der Zusammenfassung seiner "Analytischen Theorie der Wärme" schreibt er: "Die Wahrheit dieser Gleichungen beruht nicht auf einer physikalischen Erklärung der Wärmewirkungen. Wie man auch das Agens 'Wärme' ansehen mag, ob man es als ein bestimmtes materielles Sein, das von einem Teile des Raumes zu einem andern übergeht, oder ob man es lediglich als eine Übertragung von Bewegung betrachtet, man gelangt stets zu derselben Differentialgleichung für ihre Verbreitung, weil eben die besondern Hypothesen, die man etwa über ihre Natur sich bilden wollte, die allgemeinen und einfachen Tatsachen mit enthalten müssen, die zur Ableitung jener Gleichungen geführt haben."³

1) Fourier 1884, 1=§1

2) Ohm 1892, 106

3) Fourier 1884, 457=§432

Bei Ohm selbst sind in dieser Frage noch Reste eines eher romantischen Denkens vorhanden. Zumindest anfänglich hat er nicht ganz so geurteilt wie Fourier. Für ihn ist z.B. durch die mathematische Analogie der Wärme- mit der Elektrizitätslehre auch ein tieferer Zusammenhang dieser Naturerscheinungen gegeben:

Die Form und Behandlung der so erhaltenen Differenzialgleichungen ist denen für die Wärmebewegung durch Fourier und Poisson uns gegebenen so ähnlich, daß sich schon hieraus, wenn auch weiter keine anderen Gründe vorhanden wären, der Schluß auf einen inneren Zusammenhang zwischen beiden Naturerscheinungen mit allem Rechte machen ließe, und dieses Identitätsverhältnis nimmt zu, je weiter man es verfolgt.¹

Auch in seiner Sicht der Mathematik zeigt sich Ohm durchaus als Zeitgenosse der Romantik. In seiner Eingabe an das Preußische Unterrichtsministerium, in dem er um ein Jahr Urlaub für seine Studien nachsucht, gibt er eine fast hymnische Wertschätzung der Mathematik und sieht in ihr das vollkommene "Bildungsmittel" für die "intellektuellen Bildungskräfte des Menschen".² Den anderen Bildungsmitteln fehlen "jene beiden wesentlichen Erfordernisse, nach welchem die griechischen Jugendbildner vor allem strebten: innere Einheit und Eigentümlichkeit."

Andererseits ist er sich aber bewußt, daß die Physik keine realistische Darstellung der Natur liefern kann, sondern allenfalls ein Bild, eine Metapher: Auf S. 109 unten brachten wir ein Zitat von Ohm, wo es heißt, daß er durch das Wort "Elektrizitätsmenge" nichts über

1) Ohm 1892, 64

2) Hartmann 1927, 66f.

die materielle Beschaffenheit der Elektrizität festzusetzen gedenke. Er fährt dann fort: "Dieselbe Bemerkung gilt von allen eingeführten bildlichen Ausdrücken, ohne die nun einmal unsere Sprache, vielleicht aus gutem Grunde, nicht bestehen kann."¹ Mit einer solchen Sicht steht Ohm im Widerspruch mit den meisten seiner Zeitgenossen in Deutschland.

Durch die von Ohm vorgelegte Theoretisierung des Bereichs "galvanische Elektrizität" wird auch die Einstellung zum Experiment geändert. Wie wir gesehen haben, waren die bisherigen Experimente mehr darauf gerichtet, einzelne qualitative Erscheinungen an der galvanischen Kette zu erklären bzw. neue Erscheinungen erst hervorzurufen. Außerdem wurde sehr viel Energie darauf verwendet, die Instrumente, die zur Erzeugung dieser Erscheinungen gebraucht wurden, zu verbessern oder neue zu erfinden. Eine Versuchsreihe großen Stils, die ein behauptetes Gesetz in seinen verschiedensten Auswirkungen bestätigen oder widerlegen sollte, wurde (wenigstens in Deutschland) nicht durchgeführt.² In Ohms "Galvanischer Kette" werden aber genau für diese Art und Weise des Experimentierens weite Bereiche eröffnet. Gustav Theodor Fechner war der erste, der (1831) in der Elektrizitätslehre in Deutschland eine solche Versuchsreihe durchführte. Er wies die Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes auch für inkonstante Stromquellen nach.

1) Ohm 1892, 109

2) Ausnahmen sind Förstemann und Bischoff, die in Kastners Archiv der gesamten Naturlehre publizierten.

3.2 Die Rezeption der Ohmschen Theorie

In sehr vielen Darstellungen der Geschichte der Elektrizitätslehre ist zu lesen, daß es nur oder hauptsächlich die experimentfeindliche, spekulative Naturphilosophie in Deutschland gewesen sei, die die sofortige Anerkennung des Ohmschen Gesetzes verhindert hat.¹ Gleichzeitig wird behauptet, daß ein nüchterner und experimentierender Physiker, der nicht von der Naturphilosophie angesteckt war, Ohms Gesetz gleich anerkennen mußte, d.h. daß es für ihn als einen rationalen Wissenschaftler keine Barrieren auf dem Weg zum Verständnis dieses Gesetzes geben konnte. Ein genauerer Blick auf die Rezeptionsgeschichte des Ohmschen Gesetzes und der Ohmschen Theorie zeigt jedoch, daß diese Sicht nicht zutreffend ist. Wohl ist es richtig, daß eine extrem naturphilosophische Einstellung dem Verständnis hinderlich war, aber umgekehrt gab es auch im atomistischen Lager Barrieren im konzeptuell-kognitiven Bereich. Außerdem muß man berücksichtigen, daß Ohm selbst auch Elemente der Naturphilosophie und andere, sozusagen "ältere" Elemente in seine Theorie mit einbaute. Darüberhinaus gibt es auch Fälle, bei denen die Anerkennung von Ohms Leistung nur auf einem Mißverständnis beruht.

3.21 Hindernde Faktoren

Für einen Atomisten mußte es wohl am problematischsten erscheinen, daß Ohm die "freie Elektrizität" in

1) Vgl. z.B. Hartmann 1927, 83; Winter 1944, 371 passim; Gerlach 1960, 238 & 250

einem geschlossenen Stromkreis mit der "strömenden Elektrizität" in Verbindung bringt. Ein Atomist wird zwar zugeben, daß zum Zustandekommen eines Stromflusses eine gewisse Spannung an der Säule vorhanden sein muß, im Sinne eines Durchschlagsphänomens. Mit dem Stromfluß an sich hat das aber nichts zu tun. Dafür ist nur die Leitfähigkeit des Schließungsdrahts und des Zwischenleiters verantwortlich und nicht die evtl. auftretende freie Elektrizität.

Auch die Versuche, die Ohm in seinem Artikel von 1826 beschreibt (s.o.S.103), können darüber nicht hinweg helfen. Ohm verändert in diesen Versuchen nur x (den variablen, äußeren Widerstand) und läßt die materielle Beschaffenheit von x , sowie b (Innenwiderstand) und insbesondere a (von der "erregenden Kraft" des Stromkreises abhängige Größe) konstant. Auch in der "Galvanischen Kette" gibt Ohm keine weiteren Versuche in diesem Punkt an. Damit sind einerseits die Bedenken von Schweigger nicht ausgeräumt, der aus Ohms Versuchen höchstens ein "Gesetz" für ein bestimmtes Material bei einer bestimmten Spannung der offenen Säule hätte herauslesen können. Es ist nämlich durch die Versuche keineswegs erwiesen, daß diese Formel sowohl für variable Spannungen als auch für andere Metalle gültig ist.

Der Spannungsbegriff bei Ohm mußte nicht nur wegen der Anwendung auf den fließenden Strom neu und suspekt erscheinen, sondern auch durch seine Nähe zu naturphi-

losophischen und dynamistischen Vorstellungen. An jedem Punkt eines stromdurchflossenen Leiters, der homogen ist, besteht in Ohms Theorie dasselbe Spannungsgefälle. Bei Erman liest sich das ähnlich in einer dynamistischen Form:

Erst Oersted's Entdeckung öffnete uns die Augen, und zeigte, daß an jedem Punkte des schließenden Metall-Leiters wirklich der ganze Gegensatz vorhanden ist, mit einer Spannung (?) [dieses Fragezeichen ist vom Herausgeber Gilbert], wie sie bei zwei einander so nahe gerückten und so kräftig sich anziehenden Wesen, die doch immerfort getrennt bleiben müssen, zu erwarten ist.¹

Auch bei Pohl haben wir diesen Gedanken schon kennengelernt.

Ein anderer Einwand gegen die Experimentanordnung stammte von Pfaff: Da durch mehrere Umstände, z.B. durch unipolare Phänomene in der Säule die strömenden Elektrizitäten, was ihre Wirkung angeht,^{sich} unterscheiden können, ist Ohms Ergebnis nicht repräsentativ. Eher sei das Verfahren von Becquerel vorzuziehen, bei dem zwei gegeneinander gewundene zusammenhängende Drahtspulen die Magnetnadel ablenken. Denn hier ist gewährleistet, daß

jeder Fehler, der bei der Berechnung der Stärke des Stromes aus der verschiedenen Abweichung der Magnetnadel so leicht begangen werden kann, bei Becquerel's Verfahren gänzlich wegfällt, sobald man nur immer die Umstände so abändert, daß von beiden Seiten gleiche Leitung statt findet, die sich immer mit Sicherheit aus dem stationären Stande der Nadel ergeben wird. Eben weil Ohm den Grad der Leitung durch Drähte von demselben Metalle, aber von verschiedener Länge aus der Größe der Abweichung der Magnetnadel, die an einem Coulomb'schen Drehapparate hing, berechnete, wobei Fehler auf mannigfaltige Weise begangen werden können, dürfen wir den Resultaten seiner Ver-

1) Gilb. Ann. 67, 1821, 407f.

suche vor denen Davy's und Becquerel's keinen Vorzug einräumen und müssen übrigens, was die allgemeine algebraische Formel betrifft, unter welche er die von ihm erhaltenen Resultate zu bringen versucht hat, auf seine Abhandlung selbst verweisen.¹⁾

Ein weiterer Einwand richtete sich gegen die von Ohm benutzte Stromquelle, ein thermoelektrisches Element. Da der Zusammenhang von Elektrizität und Wärme und/oder Elektrizitätsleitung und Wärmeleitung noch ein offenes und wichtiges Problem war, konnte die Vermutung nicht völlig von der Hand gewiesen werden, daß in einem thermoelektrischen Stromkreis spezifische Faktoren auftreten, die das Ergebnis auf Voltasche Stromquellen nicht übertragbar gemacht hätten. Eben das "Wogen der Kraft" der Säule, ihre damals noch nicht zu überwindende Inkonstanz, schien darauf hinzudeuten. Außerdem hatte man bei gleicher elektromagnetischer Aktion eines thermoelektrischen und voltaschen Stromkreises im voltaschen Stromkreis starke chemische Aktivität erzeugen können, im thermoelektrischen jedoch nicht, was für manche Physiker sogar auf einen qualitativen Unterschied hinzuweisen schien.

Für einen Chemiker kamen zu diesen Gründen noch weitere hinzu, die eine Ablehnung ermöglichten. Ohms Theorie nimmt einen Innenwiderstand der voltaschen Säule an. Einem Chemiker mußte diese Charakterisierung unsinnig erscheinen. Einem Teil des Stromkreises, der die elektrische Wirkung allererst bewirkt, nämlich dem feuchten Zwischenleiter im Kontakt mit den Metallen, kann sinnvollerweise kein eigener Widerstand zugesprochen werden.

1) Pfaff 1831, 150

Zwischen leitendem Teil und erzeugendem Teil des Stromkreises gibt es einen qualitativen Unterschied. Auch für die Physiker, die die Voltasche Säule als eine besondere Art von Kondensator ansahen, war der Begriff eines Innenwiderstandes absurd. In einer solchen Weise sprach sich der Physiker Erman über Ohms Aufsatz "Theorie der durch galvanische Kräfte hervorgebrachten galvanischen Erscheinungen" aus: Diese sei "ohnstreitig von sehr großem Interesse ... wobei jedoch der Zweifel entstehen kann, ob das für Schlußleiter [äußerer Teil des Stromkreises] Geleistete ebenso ungezwungen und genügend auch auf den inneren Ladungsmechanismus der Säule selbst passen mag!"¹

Die "Galvanische Kette" mußte den Chemikern noch problematischer erscheinen. Ohm geht darin nämlich so vor, daß er die chemischen Erscheinungen erst einmal beiseite läßt und methodisch ausschließt. Das Bestreben der Chemiker war es jedoch immer gewesen, die chemischen Erscheinungen als das Primäre anzusehen, von dem zu abstrahieren von Grund auf falsch wäre. Es mußte einem Chemiker grell in den Ohren klingen, wenn er Ohms Einschätzung der chemischen Seite der galvanischen Erscheinungen las:

Die chemischen Veränderungen, welche so häufig in einzelnen, meistentheils flüssigen, Theilen einer galvanischen Kette vor sich gehen, benehmen der Wirkung ihre natürliche Reinheit und verbergen durch die Verwicklungen, welche sie herbeiführen, den eigentlichen Hergang der Sache ungemein; in ihnen liegt der Grund eines beispiellosen wechsels der

1) Hartmann 1927, 73

Erscheinung, der zu so vielen scheinbaren Ausnahmen von der Regel, manchmal wohl gar zu Widersprüchen, in so weit der Sinn dieses Wortes nicht selbst mit der Natur in Widerspruch steht, Anlaß giebt. Aus dieser Ursache habe ich die Betrachtung solcher galvanischer Ketten, in welchen kein Theil eine chemische Veränderung erleidet, von jenen, deren Thätigkeit durch eine chemische Wirkung getrübt wird, strenge geschieden.¹

An einer späteren Stelle gibt er eine Einschätzung der Versuche von Davy, Becquerel und Barlow, die seiner Ansicht nach alle "mit einander den Übelstand [theilen], daß sie eine fremdartige, durch die chemische Veränderung des flüssigen Theils der Kette herbeigeführte Quelle der Veränderlichkeit in sich aufgenommen haben."² Die Tatsache, daß sich Ohm so nachdrücklich als Anhänger der Voltaschen Kontakttheorie bekannte, mag vielen Wissenschaftlern den Zugang zu Ohms Werk verbaut haben.

Der Chemiker Berzelius brachte noch einen weiteren Einwand gegen Ohms Theorie vor, der im Grunde auch die Nichtberücksichtigung chemischer Erscheinungen zum Inhalt hat. Er betraf die Unipolarität, die man im elektrolytischen Prozeß auftreten sah. Ohm erklärte die auftretenden Phänomene nicht als spezifisch chemische Eigenschaften der Leiter, sondern als elektrochemische Polarisation:³ Darunter versteht man das Auftreten von Gegenspannungen bei der Elektrolyse durch Ausscheidungen, chemische Veränderungen an den Elektroden und Konzentrationsänderungen im Elektrolyten. Berzelius wollte diese Erklärung nicht gelten lassen: "Diese Erklärung ist sehr einfach, allein durchaus nicht zureichend. ... Eine Theo-

1) Ohm 1892,

2) Ohm 1892,

3) Ohm 1892, 344-401, ein Aufsatz von 1830

rie, die nicht alle Erscheinungen von Unipolarität erklärt, kann nicht die richtige sein."¹ Allerdings gibt Berzelius nicht die näheren Gründe an, die ihn zur Ablehnung bewegt haben. Es ist zu vermuten, daß die Einwände von Berzelius in der Fachwelt noch Nahrung gefunden haben durch die Ansicht Fechners, der die Polarisation als einen speziellen Übergangswiderstand erklärt, der beim Übergang des Stromes von einer Flüssigkeit in ein Metall oder umgekehrt auftritt. In dieser Frage stand er längere Zeit in wissenschaftlichem Streit mit Ohm. Ein Chemiker konnte diesen Begriff des "Übergangswiderstandes" als eine von einem Kontakttheoretiker mißverstandene Erscheinung der Unipolarität deuten, während ihnen dieser Weg bei Ohms Theorie nicht gangbar war.

Wie wir bisher sahen, lagen die Widerstände für das Verständnis der Ohmschen Theorie für die Atomisten hauptsächlich in den neuen Begriffen und in der eigentümlichen Art der Experimentanordnung. Für die Chemiker war die Bedrohung der chemischen Methode bei der Arbeit mit dem Galvanismus ausschlaggebend. Für beide Gruppen waren im Grunde Coulombs Versuche über den Stromverlust der statischen Elektrizität längs Isolatoren paradigmatisch für Stromleitung schlechthin. Ohm sagt darüber nichts aus, was Erman in seinem obengenannten Gutachten kritisch anmerkt: Es bleibe "die Frage, warum die Leiter der sogenannten gewöhnlichen Friktions-Elektricität

1) Berzelius 11, 1832, 21ff.

nicht gerade dieselben Eigenschaften darbieten, als die der galvanisch bedingten."¹ Tatsächlich ist diese Frage erst sehr viel später von Warburg gelöst worden,² der den Elektrizitätsverlust modern erklärt. Auch dadurch, daß Ohm im Gegensatz zu Laplace Molekularwirkungen ausschließt, die sich über die Stelle des Kontaktes zweier Moleküle erstrecken, wird die Gültigkeit des Coulombschen Gesetzes für fließende Elektrizität geleugnet. Durch seine Theorie hat Ohm den ^{Zusammenhang} der etablierten Elektrostatik mit der Dynamik, d.h. von Elektrizitätsentladung und Elektrizitätsleitung, erst einmal unterbrochen.

Überhaupt hatte man auch eine ganz andere Vorstellung von einem "Leitungsgesetz" als Ohm. Was man suchte, war ein Zusammenhang zwischen der materiellen Beschaffenheit eines Körpers und seiner Leitfähigkeit (analog etwa zu Ritters Hypothese, daß die Oxydierbarkeit der Metalle in geradem Verhältnis zum Leitungsvermögen stehe³). "Ein auf irgend eine physische Eigenschaft der Körper gebauetes allgemeines Gesetz der Leitung und Nichtleitung ist noch nicht gefunden worden", schreibt Muncke 1830⁴. Ein solches Gesetz hätte aber viel eher in den allgemeinen qualitativen Rahmen der vorohmschen Physik gepaßt als Ohms Gesetz. In diesem Sinne gab Ohms Theorie auf die qualitativen Fragen, die in der Elektrizitätslehre seiner Zeit anstanden,

1) Hartmann 1927, 73

2) Pogg. Ann. 18, 145. Vgl. Wiedemann 1893/98,

3) Pfaff 1828, 793

4) Muncke 1830, 145

keine Auskunft. Auch daraus ist die Zurückhaltung, besonders der atomistischen Physiker, zu erklären.

Nach einiger Zeit schlug sich ein Teil der Kontakttheoretiker auf die Seite Ohms. Das heißt nicht, daß sie die Bedeutung der Ohmschen Arbeit unbedingt anerkannt hätten. Sie sahen vielmehr in Ohm einen Bundesgenossen gegen die Chemiker und Dynamisten. Noch 1848 schreibt Seyffer: "Die schon jetzt auf eine consequente Weise durchgeführte Volta'sche Contacttheorie erhielt ihre eigentliche mathematische Begründung und Ausbildung durch die Maßbestimmungen Ohms und Fechners."¹ Im Jahre 1845 wirft Pfaff z.B. Faraday vor, er gehe von willkürlichen und unklaren Voraussetzungen aus. Umständen, welche die Stärke des Stromes bestimmen, von der Affinität aber ganz unabhängig seien und die auch vorzüglich Ohm so schön aufgeklärt hätte und die sich im allgemeinen auf Leitungsverhältnisse reduzieren ließen, habe er eine vollkommen dunkel bleibende Intensität der Affinität substituiert.²

1837 interpretiert Pfaff Ohms Ergebnisse ganz im Sinne der Voltaschen Theorie und elektrostatischer Vorstellungen um. Nach Volta hängen die Wirkungen der Säule von den Bedingungen des Leitungsvermögens im inneren und äußeren Stromkreisteil ab. Ohms Gesetz wurde einfach als Bestätigung dieses Sachverhalts angesehen:

Die absolute Quantität von Elektrizität, welche in jeder Kette in Thätigkeit gesetzt wird (die Größe des elektrischen Stromes) selbst hängt nun ab

1) Seyffer 1848, 162

2) Pfaff 1845, . Vgl. auch Seyffer, 1848, 249.

von der Größe der elektromotorischen Thätigkeit, aus der Wechselwirkung aller Glieder der Kette (in der gewöhnlichen Kette durch die überwiegende elektromotorische Thätigkeit der beiden Metalle bestimmt) resultirend, und von dem Leitungsmomente in der Kette, und ist jener Größe gerade, und dem letztern, wenn dasselbe als Leitungs-Widerstand aufgefaßt wird, umgekehrt proportional, oder durch einen Quotienten

$$= \frac{A}{L} \quad \begin{array}{l} \text{(elektromotorische Thätigkeit)} \\ \text{L (Leitungswiderstand)} \end{array}$$

darstellbar.

Die elektromotorische Thätigkeit bestimmt in der offenen Kette die freie Spannung der Kettenglieder, welche man die statische Intensität der Elektrizität nennen kann, so wie die Intensität des Stromes selbst durch den Ausdruck dynamischer Intensität bezeichnet werden könnte. Jene statische Intensität bezieht sich jedesmal auf den elektrischen Spannungsunterschied der Endglieder der offenen Kette, und ist der Größe dieses Spannungs-Unterschiedes genau proportional. Ihr Maaß ist nur die anziehende und abstoßende Wirkung, welche durch gewöhnliche Elektrometer gemessen wird. Auf sie vorzüglich bezieht sich das Übergewicht, welches in gewissen Fällen die Säule in ihrer Thätigkeit hat, bei welcher nach der gewöhnlichen Construction die statische Intensität, oder der elektrische Spannungsunterschied der Endglieder mit der Zahl der Elemente zunimmt. Der Leitungswiderstand ist ein sehr zusammengesetztes Verhältniß ... ¹

und dann werden alle Faktoren breit geschildert, die nach Pfauffs Ansicht die Leitfähigkeit beeinflussen. Die dynamische Intensität sei demnach nur "auf bloße quantitative Verschiedenheiten" zurückzuführen, nicht auf eine "specifische, eine qualitativ eigenthümliche" Intensität, wie es Faraday behauptete.

Schweiggers Verständnis der Ohmschen Arbeiten scheint ähnlich gewesen zu sein. In einem Brief an Ohm, in dem es über die Veröffentlichung eines Artikels geht, schreibt er: "Was das elektrische Gesetz anlangt, wovon die Rede ist, so könnte man solches vielleicht auch so

1) Pfaff 1837, 162f.

ausdrücken: Je rascher der elektrische Strom ist, desto mehr wird er durch lange Leitung benachteiligt. Daß die Raschheit dieses Stromes auch von der Spannung der Metalle abhängig ist ebenso wie von der Natur der leitenden Flüssigkeit, ist gewiß nicht zu bezweifeln."¹

Auch Erman spielt die Bedeutung des Ohmschen Gesetzes herunter. Für ihn ist die Formel $X = k w \frac{a}{l}$ "fast identisch ... mit der von Davy gegebenen."²

Man kann nach solchen Ausführungen nur sagen, daß Pfaff, Schweigger und Erman die Ohmsche Theorie nicht richtig verstanden haben und daß sie mit ihren Argumenten die Aufnahme der Theorie eher hinderten als förderten. Denn einerseits mußte dadurch die Bedeutung der Ergebnisse recht gering erscheinen und andererseits wurde es den Chemikern dadurch noch schwerer gemacht, die neue Theorie zu akzeptieren.

Die These, daß viele Kontakttheoretiker, besonders der älteren Generation, Ohms Theorie als Variante und/oder als Uminterpretation bestehender Theorien ansahen, wird auch noch gestützt durch die Tatsache, daß in den Arbeiten der Kontakttheoretiker, die vertraut mit Ohms Arbeit waren, der mathematische Teil der Ohmschen Theorie völlig ignoriert wird und lediglich, wenn überhaupt, das Ohmsche Gesetz $I = A/W$ erscheint.³ Das hat bestimmt auch darin seinen Grund, daß die mathematische Ausbildung und Vorbildung noch sehr mangelhaft war.⁴ Ausschlag-

1) Hartmann 1927, 97f.

2) Hartmann 1927, 73

3) z.B. Pfaff 1837 und 1845, Brandes 1830 und Kastner 1832

4) vgl. dazu Lorey 1916

gebender scheint indes gewesen zu sein, daß die Relevanz der Mathematik für solche Probleme angezweifelt wurde. Martin Ohm schreibt im Herbst 1827 an seinen Bruder: "Schweigger ... weiß nicht recht, was eine mathematische Behandlung soll."¹ Ein Mann wie Kämtz hat zwar anfänglich Schwierigkeiten mit dem mathematischen Teil der "Galvanischen Kette". Bei der Vorbereitung der Rezension für die Allgemeine Literatur-Zeitung "freut er sich täglich, daß er immer mehr daraus lerne und nach und nach eines um das andere einsehe"², wie Martin Ohm schreibt. Aber selbst nachdem Kämtz die Mathematik gemeistert hatte, wovon die erschienene Besprechung³ Zeugnis gibt, kann er das Ohmsche Werk absolut nicht verstehen, wovon Martin Ohm wieder seinem Bruder berichtet.⁴

Bisher sprachen wir nur von den Schwierigkeiten, die Kontakttheoretiker und Chemiker mit Ohms Theorie hatten. Der Dynamist Pohl nimmt seine Rezension der Ohmschen "Galvanischen Kette" zum Anlaß, im ersten Teil die Relevanz der Mathematik für die Physik einer allgemeinen Untersuchung zu unterziehen. Seine Einschätzung mag zwar dynamistisch-naturphilosophisch überhöht und radikalisiert sein, im Grunde ist sie aber nur der konsequente Ausdruck für die Haltung, wie sie bei Schweigger, C.H. Pfaff, Kastner, Brandes, Kämtz u.a. zum Ausdruck kommt. Denn "überall kann der Körper nur aus dem Geist, das Quantitative nur aus dem Qualitativen verstanden werden; wo

1) Führtbauer 1939, 157

2) ibid. 163

3) Kämtz 1828

4) Führtbauer 1939, 163

die entgegengesetzte Richtung allein oder auch nur vorherrschend geltend gemacht wird, da ist der kalte Tod und die Vernichtung alles Wissens."¹

Abgesehen von der Polemik gegen mathematische Behandlung physikalischer Fragen und gegen die atomistische These von dem materiellen Charakter der Elektrizität bemängelt Pohl auch noch andere Dinge. Er sieht die empirische Basis der Theorie für zu schmal an und stellt fest, daß der Zusammenhang der Messung mit dem Elektrometer an der offenen und unvollkommen geschlossenen Kette und einer Messung mit dem Multiplikator an der vollkommen geschlossenen Kette, wie Ohm ihn ja herstellt, überhaupt nicht begründet wird: Es fehlt "in der Theorie des Verfassers an einer befriedigenden Nachweisung eines solchen Zusammenhanges und auch aller Rechtfertigung darüber, wie die Magnetnadel plötzlich dazu komme, die Functionen des Electrometers zu vertreten."² Damit hatte Pohl nicht unrecht.

Besonders von den französischsprachigen Physikern mußte Ohm noch lange zu hören bekommen, daß seine Theorie rein hypothetisch sei. Auf den ersten Blick mag das verwunderlich erscheinen, denn gerade die enge Anlehnung Ohms an ein französisches Vorbild (Fourier), hätte eine schnelle Anerkennung ermöglichen müssen. Für die Tatsache, daß es so weit kam, sind wohl zwei Faktoren am ausschlaggebendsten gewesen. Auf der einen Seite geht es um 1830 in Frankreich generell mit der so brilliant

1) Pohl 1828, 92

2) *ibid.* 99f.

aufgetretenen mathematischen Physik schnell zu Ende. Die Gründe dafür sind noch dunkel und in der Geschichtsschreibung umstritten.¹ Andererseits waren die wichtigsten Physiker, die sich mit dem Galvanismus beschäftigten, durchweg Anhänger der chemischen Hypothese.

De la Rive z.B. stellt Ohm und W. Weber in eine Reihe mit der spekulativen Naturphilosophie, die da meine, ohne Experimente auskommen zu können:

Et puisque nous faisons une réserve, nous en profiterons pour protester hautement contre la tendance illogique qui règne dans ce mémoire (de Mr. Weber), dans le livre de Mr. Ohm, dont les Archives ont rendu compte, et dans d'autres productions des premiers savants de l'Allemagne, tendance qui consiste à présenter les résultats des recherches instrumentales comme les conséquences de certaines lois qu'on pose en prémisses et a priori, au lieu de montrer, conformément à la vérité historique, que ces lois découlent au contraire des expériences, qu'on a faites dans un but plus ou moins déterminé, et d'avouer, qu'elles sont entachées de toutes les incertitudes et de toutes les irrégularités, qui peuvent être inherentes dans l'état actuel d'observations qu'on a choisis.²

Noch 1858 (!) schreiben A.C. und E. Becquerel, Ohm habe in der Galvanischen Kette a priori seine drei Grundgesetze aufgestellt und sei von der Kontakttheorie ausgegangen, welche falsch sei. Dagegen habe Pouillet schon 1828, später 1831 und 1837 auf rein experimentellem Wege das Gesetz gefunden. Implizit wird gefordert, der Pouillet'schen Arbeit mehr zu folgen als der Ohmschen, weil sie frei sei von hypothetischen Voraussetzungen.³ Erst 1860 schreibt J.-M. Gaugain im Vorwort zu der ersten französischen Übersetzung von Ohms "Galvanischer Kette":

1) Kuhn 1976, 116

2) Archives de l'électricité 5, 449. Zit. nach Beetz 1849,

3) Becquerel 1858, 200ff.

444f.

"Il est évident à mes yeux que l'on n'a pas rendu justice à ce savant lorsqu'on a présenté sa théorie comme une conception mathématique basée sur une pure hypothèse."¹

Noch ein rein äußerer Faktor, der den Widerstand gegen Ohms Theorie erklären soll, wurde von wissenschaftssoziologischer Seite angeführt. Barber schreibt, Ohms experimentelle Arbeiten seien wegen seines niedrigen akademischen Status (er war damals Lehrer am Jesuitengymnasium in Köln) nicht anerkannt worden.² Dazu ist zu sagen, daß im dritten Jahrzehnt des 19. Jahrhunderts die Professionalisierung der Physik noch nicht so weit fortgeschritten war, als daß nicht auch ein Gymnasialprofessor von seiner Stellung her ernst genommen werden konnte. H.A. Brettner z.B., ein Lehrer am Gleiwitzer Gymnasium, schrieb einen immer wieder aufgelegten "Leitfaden der Physik" (17. Aufl. 1868), der auch an den Universitäten Verwendung fand. Ohms Widersacher Pohl war bis 1829 Professor an einem Berliner Gymnasium und Kirchhoff konnte schon als 21jähriger Student in Poggenдорffs Annalen publizieren; ebenso war Poggendorff selbst noch Student, als er Gilberts Annalen als Herausgeber übernahm.

Zusammenfassend können wir sagen, daß das starre Festhalten an den vor Ohm gängigen Theoretisierungsversuchen das größte Hindernis für die Annahme und das Verständnis der Ohmschen Arbeiten war. Besonders hinderlich

1) Ohm 1860, 4

2) Barber 1962, 215

war, daß Ohm sich selbst so definitiv als Kontakttheoretiker verstand und damit für Mißverständnisse an allen Fronten sorgte: Chemiker konnten ihn schon wegen des Bekenntnisses zur Kontakttheorie nicht anerkennen, ganz zu schweigen von den Dynamisten. Die Kontakttheoretiker konnten aus demselben Grunde zwar Ohms Gesetz akzeptieren, übersahen aber dabei, daß Ohm nicht nur eine leichte Variation der Davy'schen Theorie brachte oder nur eine Bestätigung der Kontakttheorie lieferte, sondern mit seiner Theorie eine ganz neue Begrifflichkeit in die Elektrizitätslehre einführte.

3.22 Fördernde Faktoren

Es waren im Großen und Ganzen drei Faktoren, die die Anerkennung der Ohmschen Untersuchungen förderten: Aufgeschlossenheit für mathematische Methoden in der Physik, Interesse an der praktischen Verwendbarkeit der Elektrizitätslehre und damit im Zusammenhang stehend, die theoretische Fundierung der elektrischen Meßtechnik.

Die beste Besprechung der "Galvanischen Kette" stammt von Johann Wilhelm Andreas Pfaff (1774-1835), einem Bruder des oft erwähnten Christoph Heinrich Pfaff (1773-1852)¹. Auf 28 Seiten gibt er eine vollständige Übersicht über Ohms Werk und auch eine noch heute vertretbare Einschätzung des Wandels, der durch Ohms Schrift in Gang gesetzt wurde.² J.W.A. Pfaff betont dabei öfter, daß Ohm durch die Einführung neuer Begriffe die statische Betrachtungsweise des geschlossenen Stromkreises überwunden habe:

Schon seit längerer Zeit besitzen wir zwar von Franzosen ersten Ranges, letztlich von Poisson mathematische Untersuchungen über die Elektrizität

-
- 1) Ein anderer der insgesamt sieben Brüder der Familie Pfaff war der Mathematiker Johann Friedrich Pfaff (1765-1825), der durch die "Pfaff'sche Form" von Differentialgleichungen berühmt wurde.
 - 2) J.W.A. Pfaff 1828. Diese Besprechung erschien nicht anonym, wie Caneva 1974, 194 behauptet, sondern unter J.W.A. Pfaffs Namen. Zwar ist es ungeklärt, wie groß der Anteil von Martin Ohm, K.W.G. Kastner und G.S. Ohm selbst an dieser Besprechung ist, doch steht außer Zweifel, daß Pfaff sie am Ende selbst verfaßt hat: Füchtbauer 1947, 164: "Jedenfalls hat Pfaff die Anzeige doch selbst verfaßt"; entgegen der Meinung Canevas, der in 1974, 194 behauptet: "Füchtbauer says Ohm himself was really the author." Auch der ganze Stil der Arbeit und die darin geäußerte Kritik sprechen für Pfaffs Autorschaft.

im Zustande des Gleichgewichts; im Zustande der Bewegung, hat sich dieses, mit Blitzesschnelle wirkende, Agens der Rechnung bisher gänzlich entzogen; denn die von Biot an dem galvanischen Apparat übernommenen, an sich sehr verdienstlichen Bemühungen der Art, abgesehen davon, daß ihnen die zum rechten Gedeihen solcher Arbeiten erforderliche feste Grundlage abgeht, erstrecken sich ebenfalls nicht über den statischen Effekt der Voltaischen Säule hinaus. Gegenwärtige Schrift hat jene Schranken durchbrochen, indem sie die Frage über die Natur der Elektrizität aus ihrem allgemeinsten Standpunkte aufgenommen und mit der, dem ächt mathematischen Gange eigenthümlichen, Strenge und Bündigkeit durchgeführt hat.¹

Weiter sagt J.W.A.Pfaff, durch Ohm sei der Begriff der elektroskopischen Kraft "festgesetzt" und ein "neuer, einer mathematischen Darstellung empfänglicher Begriff Leitungsfähigkeit eingeführt" worden.² Er kritisiert Ohm sogar dafür, nicht genügend betont zu haben, daß es sich um Neudefinitionen von Begriffen handelt, und keineswegs um die traditionellen oder gar aus der Natur erfahrenen: "Der Verfasser bedient sich hier des Ausdrucks 'gefundene Eigenschaft'; wir finden uns veranlaßt, auch hier wiederum zu bemerken, daß wir diese Eigenschaft nicht als eine gefundene, oder aus den zum Grund gelegten Sätzen abgeleitete, erkennen, sondern eine als Princip aufgestellte und angenommene, aus den allgemeinen Annahmen für Leitung."³

Pfaff erkennt auch sofort die Problemlösungsfähigkeit der Ohmschen Theorie: "Man wird zum Erstaunen hin gerissen, indem man sieht, wie ein unerwartetes Licht über fast alle galvanische Erscheinungen, die bisher nur

1) J.W.A.Pfaff, 1828, 349

2) *ibid.* 350f.

3) *ibid.* 365

durch den Schleier des Geheimnisses sich erblicken ließen, ausgegossen wird; zumal wenn man bedenkt, daß nur innerhalb eines engen Bezirkes des ganzen großen Gebiets verweilt wird."¹

Dadurch daß J.W.A.Pfaff als Mathematiker weder an die traditionellen Vorstellungen der Chemie, der Lehre vom Magnetismus, der Wärmelehre usw. gebunden war, noch allgemein an den Wert einer qualitativen Anschaulichkeit in der Physik, fiel ihm der Zugang zu Ohms Werk wesentlich leichter als anderen Wissenschaftlern. Er war jedoch nicht vollkommen fachfremd. Er hatte sich selbst mit galvanischen Versuchen beschäftigt² und sich, meist als Kritiker, an der Diskussion in Gilberts Annalen beteiligt. In einem früheren Aufsatz hatte er auch genau die Probleme der "Kette" definiert, die sich in der Folge als die theoretisch wichtigsten herausstellen sollten: er schreibt, er habe einige elektrisch-magnetische Versuche gemacht, "die ich mir noch nicht mit den angenommenen Begriffen von Unerschöpflichkeit der galvanischen Kette oder Säule, von Strömungen von einem Pol zum andern, vom Rotiren der Kraft um die Achse des Drahts, so unmittelbar zusammen reimen kann."³

Außer J.W.A.Pfaff setzte sich noch Kämtz in einer rein deskriptiv gehaltenen Besprechung⁴ mit dem im engeren Sinne theoretischen Teil der Ohmschen Arbeit auseinander. Außerdem gibt es noch eine sehr kurze Rezension von Brandes und eine ausführliche Berücksichtigung im

2) z.B. Gilb. Ann. 72, 1823, 277
1) Pfaff 1828, 353

3) Gilb. Ann. 68, 1828, 422f.
4) Kämtz 1828

Supplementband der Naturlehre Baumgartners.¹ Bis ca. 1840 setzt sich keine Arbeit mit dem theoretisch-mathematischen Aspekt des Ohmschen Werks auseinander. F.C. Henrici beweist 1841, daß sich die Gleichungen, die Pouillet 1837² auf empirischem Wege gefunden zu haben behauptete, "aus den Grundsätzen der Theorie Ohms" herleiten lassen.³ Seit dieser Zeit werden mathematisch-theoretisch orientierte Arbeiten zum Ohmschen Gesetz immer häufiger. Darauf wird im nächsten Abschnitt noch näher eingegangen.

Eine andere Gruppe von Wissenschaftlern ist an Ohms Gesetz hauptsächlich deswegen interessiert, weil sich damit leicht berechnen läßt, was man für die Erstellung von Telegraphenleitungen wissen muß. Besonders hervor tut sich in dieser Hinsicht der Holländer P.O.C. Vorsselman de Heer. In einem Aufsatz über die "Theorie der elektrischen Telegraphie, nebst Beschreibung eines neuen auf die physiologischen Wirkungen der Elektrizität begründeten Telegraphen"⁴ zeigt er, wie man für eine gegebene Länge einer Telegraphenleitung mithilfe des Ohmschen Gesetzes berechnen kann, unter welchen Umständen ein Maximum der Intensität erreicht wird. Die begrifflichen Schwierigkeiten, die im Zusammenhang mit dem Begriff der Spannung einer geschlossenen Kette auftreten können für einen, der sich an die vor-ohmschen Begriffe gewöhnt hat, umgeht er dadurch,

1) Siehe Brandes 1828 und Baumgartner 1831

2) Pogg. Ann. 42, 1837, 281-296=Übs. v. Comptes rendus 4, 267ff.

3) Pogg. Ann. 53, 1841, 277-294. Vgl. auch Henricis 1840, in dem Ohms Theorie S. 1ff, 142ff. und 224ff. diskutiert wird.

4) Pogg. Ann. 46, 1839, 513-537

daß er diese Größe nicht weiter identifiziert, sondern einfach als eine Konstante auffaßt, die von der Beschaffenheit der in der Säule verwendeten Metalle abhängen soll. Für seine Zwecke ist es nicht notwendig zu wissen, wie diese Größe im Lichte der Theorie zu identifizieren ist. Am Ende des Aufsatzes überlegt sich Vorsselmann sogar noch die Kosten für Telegraphenleitungen, die den englischen Kanal überqueren könnten und vermutet, daß sich der Staat durch Einrichtung solcher Verbindungen eine lukrative Einnahmequelle verschaffen könnte.

In einem andern Aufsatz desselben Jahres macht sich Vorsselmann Gedanken "Über den Elektro-Magnetismus als bewegende Kraft".¹ Als einer der ersten gebraucht er auch in diesem Zusammenhang das Ohmsche Gesetz: "Diese Formeln [Ohms zur Berechnung der Intensität aus dem Widerstand], die durch die schönen Versuche von Fechner und Pouillet vollkommen bewiesen, aber dennoch, wie es scheint, vielen Physikern gänzlich unbekannt sind, mögen hier eine Stelle finden." Poggendorff fügt in einer Fußnote hinzu: "Leider nur zu vielen! Gewiß würden wir mit mancher, ganz unhaltbaren Hypothese in der Lehre des Galvanismus verschont geblieben seyn, wenn die Urheber derselben sich ein wenig mit den eben so einfachen als fruchtbaren Principien der Ohm'schen Theorie bekannt gemacht hätten."²

Im weiteren Verlauf skizziert Vorsselmann die Konstruktion einer elektromagnetischen "Haspel", von der

1) Pogg. Ann. 47, 1839, 76-101

2) ibid. 88f.

er im Gegensatz zu einigen Mechanikern glaubt, daß sie tatsächlich eines Tages die elektromagnetische Kraft ausbeuten könne. Er zitiert die berühmten Worte des Amerikaners Silliman, der die neuen Energiequellen, die durch die Elektrizität erschlossen wurden, in seiner Zeitschrift enthusiastisch begrüßt hatte: "Science has most unexpectedly placed in our hands a new power of great but unknown energy..." Vorsselmann fühlt sich dadurch ebenfalls zu einer Vision angeregt:

Wird nun die elektromagnetische Haspel ein Mal dazu dienen können, die Axen unserer Fabriken in Bewegung zu setzen? Werden wir den [durch einen Elektromotor bewegten] Wagen des Hrn. Stratingh bloss auf den Tischen unserer Hörsäle oder vielleicht noch auf der Straße von Amsterdam nach Harlem fahren sehen? Kurz ist es möglich, durch den Elektro-Magnetismus, wenn auch nur in einzelnen Fällen, den Dampf zu ersetzen, und wenn es so ist, wird der Ersatz mit einigem Vortheil gepaart seyn?

Von einer ganz anderen Seite, von der es eigentlich nicht zu vermuten wäre, wird das Ohmsche Gesetz ebenfalls auf Grund seiner praktischen Vorteile für die Telegraphie anerkannt und verwendet und nicht so sehr wegen seiner theoretischen Vorzüge, nämlich von dem Mathematiker J.C.F. Gauß! Zusammen mit Wilhelm E. Weber war er 1833 der erste, der einen elektrischen Nadeltelegraphen (auf einer 2.8 km langen Strecke) in Anwendung brachte. Aus einem Bericht der Göttingischen gelehrten Anzeigen vom 9.8.1834 und anderen Quellen geht hervor, daß Gauss und Weber sich des Ohmschen Gesetzes bedient hatten: "Und doch ist dieser Umstand", schreibt Gauß, "ganz in der Ordnung, und dient nur zu neuer Bestätigung der

1) Pogg. Ann. 47, 1839, 93f.

schönen zuerst von Ohm aufgestellten Theorie."¹ In einem Aufsatz in den "Acten der Leipzig - Dresdener Eisenbahn- Gesellschaft" von 1835 erörtern Weber und Gauss dann eingehend den Gedanken, ob ihr Telegraph zur Verbesserung der Sicherheit im Eisenbahnwesen Verwendung finden könnte.²

Joseph Henry in Amerika hatte sich 1833 einige Zeit vergeblich bemüht, an Ohms Theorie heranzukommen.³ Als er sie zu Gesicht bekommen hatte, wurde ihm die praktische Wichtigkeit sofort einsichtig. Er schrieb darüber wie über ein Bekehrungserlebnis: "Als ich Ohm's Theorie zuerst las, war mir, als wenn ein Blitz ein dunkles Zimmer plötzlich erleuchtete."⁴

Auch für den damals noch jungen Physiker W.Beetz, der sich sehr um die Anerkennung des Ohmschen Gesetzes verdient gemacht hat,⁵ ist die erfolgreiche Anwendung des Gesetzes auf die Telegraphie ein sehr wichtiges Motiv. In der Zeitschrift des Berliner Telegraphen-Vereins schreibt er 1844 in einem Aufsatz über "Das Ohmsche Gesetz mit Beispielen seiner Anwendung in der Telegraphie" folgendes:

Der Zusammenhang zwischen der Stärke eines galvanischen Stromes und den Bedingungen, unter denen derselbe hervorgebracht wird, läßt sich durch ein Gesetz ausdrücken, dessen Ableitung fast ohne physikalische Vorkenntnisse verständlich ist, und bei dessen Anwendung die einfachsten Rechnungsarten ausreichen. Wiewohl bei der Kenntniß dieses Gesetzes alles Umhertappen nach den für jeden einzelnen in der Praxis

1) Gauß, Werke Bd.5, 1877, S.525. Vgl. auch Schäfer 1924
3) Winter 1944, 380
4) zit. nach Boehmer 1872, 90
5) Vgl. Beetz 1847, 442-451; 1849 passim
2) Albrecht 1885, 266

gebotenen Fall vortheilhaftesten Apparat völlig verschwindet, und eine kurze Rechnung diejenige Zusammenstellung ohne Weiteres kennen lehrt, auf welche ein zeitraubendes Probiren führen würde, so hat sich doch bis auf den heutigen Tag das von unserem Landsmanne G.S.Ohm vor nunmehr bald zwanzig Jahren aufgestellte Gesetz in weiteren Kreisen immer noch keiner ausgedehnten Bekanntschaft zu erfreuen gehabt. Immer noch hört man in den verworrensten Vorstellungen von den Eigenschaften des galvanischen Stromes reden, von der Intensität und Quantität desselben, von einem Intensitätsstrom und einem Quantitätsstrom, als seien das ganz verschiedene Dinge. Da gerade in der elektrischen Telegraphie die Frage über die Stärke, welche ein Strom unter gewissen Bedingungen annehmen muß, häufig zur Erörterung kommt, so soll im Folgenden das Ohm'sche Gesetz in möglichster Einfachheit dargestellt und Beispiele für dessen Anwendung daran geknüpft werden.¹

Auf ähnliche Weise sollte später noch einmal der Abbé François N. M. Moigno in seinem 1852 in zweiter Auflage erschienenen "Traité de télégraphie électrique" Ohm gegen seine Landsleute (besonders H.Marié-Davy und C. C. Despretz) verteidigen. Er hielt ihnen vor, wie Kistner berichtet, "daß hier eine ganze Schule sich darum bemühe, Unstimmigkeiten zwischen Meßergebnissen und theoretisch Bewiesenem hervorzurufen, und nicht klare Gesetze, sondern ein Wirrwarr von Einzelbeobachtungen und Erfahrungsformeln erstrebe."²

Es steht zu vermuten, daß auch für den Physiker Wheatstone in England die Anwendung von Ohms Gesetz auf die Telegraphie von großer Bedeutung war. 1837 erfand er zusammen mit Fothergill Cooke einen Nadeltelegraphen, der im englischen Eisenbahnwesen weite Verbreitung fand und lange Jahre verwendet wurde.³ Im Jahre

1) Beetz 1844, 49 - 66; hier 49.

2) Kistner 1925, 116. Moignos Buch war mir nicht zugänglich.

3) Albrecht 1885, 267ff. und 279

1840 führt er in einem "Bakerian Lecture" seine epochemachende Erfindung des Rheostaten ("Wheatstone'sche Brücke") vor (ausformuliert 1845), mit dem das Messen von Widerständen auf der Basis des Ohmschen Gesetzes durchgeführt wird.

Dies leitet uns über zu einer dritten Gruppe von Physikern, die Ohms Gesetz hauptsächlich deswegen anerkennen und verwenden, weil mit seiner Hilfe die optimalen Bedingungen in meßtechnischen Zusammenhängen leicht herausgefunden werden können. Dabei steht besonders das Gebiet der 1831 von Faraday und unabhängig von Henry gefundenen Induktion im Vordergrund. Ohms Gesetz funktioniert in diesen Zusammenhängen nicht nur als eine verallgemeinerte Fassung empirischer "Gebrauchsanweisungen" für vorteilhafte Experimentanordnungen, sondern auch als eine Veränderung der ganzen Sehweise, mit der die strömende Elektrizität aufgefaßt wird. Dieses vorwiegend meßtheoretische Interesse paart sich vielfach mit dem Interesse an der Anwendung der Induktion. So z.B. bei Moritz Hermann v. Jacobi (1801-1874), der als erster ein Verkehrsmittel mithilfe elektromagnetischer Kraft antreibt, nämlich ein Boot, 1835. 1839 konstruiert er eine größere Maschine von fast einem PS, 1838 erfindet er die Galvanoplastik. Symptomatisch für Jacobis Einstellung und die anderer ist folgende Äußerung aus Jacobis Aufsatz "Über das chemische und das magnetische Galvanometer":

Bald nach der Erfindung der Volta'schen Säule bediente man sich häufig der bekannten Wasserzersetzungsapparate als eines Maaßes, um die Wirkung der verschiedenen Säulen nach der Anzahl oder Größe der Elemente, der Stärke der Ladung usw. mit einander zu vergleichen. Man kam aber hierbei zu keinem oder nur zu unerheblichen Resultaten, auch nicht sobald zum Bewußtseyn, daß dieser Mangel an Erfolg nothwendig der Unzulänglichkeit der Beobachtungs- oder vielmehr der ganzen Betrachtungsweise zugeschrieben werden müsse. Erst das Ohmsche Gesetz und Fechners Untersuchungen haben uns den Einfluß kennen gelehrt, den die verschiedenen Elemente der geschlossenen Kette ausüben, und wie derselbe in Rechnung zu bringen sey.

Neben Jacobi sind in dieser Gruppe noch zu nennen:

Munck af Rosenschöld, für den mit Ohms "meisterhaften Werken" eine "neue Periode in der Lehre vom Galvanismus beginnt"², sowie Heinrich Friedrich Emil Lenz³ und J.C. Poggendorff.⁴

Am bedeutendsten waren jedoch die Untersuchungen, die Fechner⁵ im Zusammenhang mit dem Ohmschen Gesetz anstellte. In der zweiten Auflage seiner deutschen Bearbeitung von Biots Experimentalphysik bringt Fechner als dritten Band ein eigenständiges und von ihm selbst verfaßtes Werk heraus unter dem Titel "Lehrbuch des Galvanismus und der Elektrochemie", mit der Begründung, seit Erscheinen des Biotschen Originals 1816 hätten sich ganz neue Gesichtspunkte ergeben, als daß eine Neukommun-
tierung der Übersetzung noch möglich und gerechtfertigt wäre. In diesem Werk wird Ohms Gesetz uneingeschränkte

1) Pogg. Ann. 48, 1839, 26

2) Pogg. Ann. 43, 1838, 476

3) Pogg. Ann. 34, 1835, 385-437; 47, 1839, 225-270, 401-18, 584-93

4) Pogg. Ann. 49, 1840, 31-72

5) Gustav Theodor Fechner (1801-1887) stellt in seinen Beiträgen zur Elektrizitätslehre den reinsten Typ einer neuen Physikergeneration vor. Jedoch wird von ihm berichtet, er habe 1822 bei der Lektüre Schellingscher Schriften eine Art Bekehrungserlebnis gehabt, das er in seinem Werk "Üb. die physik. & philos. Atomenlehre" 1854 gedanklich bewältigt.

und umfassende Anerkennung zuteil. Im Vorwort gibt Fechner eine Beschreibung der Krisensituation, wie sie vor Ohm in der Elektrizitätslehre vorherrschte:

In der That, es herrscht noch in keinem Zweige der Physik, selbst nach allem, was in den letzten Jahren für die Fortschritte des Galvanismus geschehen ist, so viel Unsicherheit und Widerstreit der Meinungen über die wesentlichsten, ja ersten Grundprincipien, als eben in dieser Lehre, so daß kaum ein Physiker ist, der nicht in mehrern wichtigen Punkten von den andern abweiche. Ja man möchte fast fragen, ob nicht die Erfindung des Multiplimators noch mehr zu Verwirrung als zur Bereicherung dieser Lehre beigetragen habe; mindestens ist die Divergenz der Ansichten seitdem um ein gutes Theil gewachsen.¹

Etwas später schreibt er dann, er scheue sich nicht zu behaupten, daß durch Ohms Theorie "erst Sinn in die Wirkungsverhältnisse der galvanischen Kette gekommen ist."²

Ohms Theorie verdiene herausgehoben zu werden

theils wegen mehrerer experimentalen messenden Versuchen, theils wegen einer mathematischen Verknüpfung der Erscheinungen, die er theils in einer eigenen Schrift, theils in mehrern Abhandlungen in physikalischen Zeitschriften niedergelegt hat, und welche nicht nur die bis jetzt bekannten Beobachtungen im Bereich des Galvanismus auf eine so getreue Weise unter sich befaßt, sondern auch auf so viele, bis jetzt dem Experiment noch nicht unterworfenen, Verhältnisse desselben, an die man früher nicht gedacht hatte, hinweist, daß man in dieser Verknüpfung einen der wesentlichsten Fortschritte der Lehre des Galvanismus anerkennen muß.³

1831 veröffentlicht Fechner seine "Maaßbestimmungen über die galvanische Kette", in der auf 260 Seiten (4⁰) die Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes für Stromkreise mit (damals noch inkonstanten) Voltaschen Säulen nachgewiesen wird mithilfe von Oscillationen der Magnetnadel im Multiplikator. Mit diesem Werk legt Fechner die erste

1) Fechner 1829, S. VIII

2) ibid. X

3) ibid. 11

moderne experimentelle Untersuchung großen Stils in der Elektrizitätslehre überhaupt vor: modern, sowohl was das Ausmaß, die Genauigkeit, die Betonung des quantitativen Aspekts als auch das Bestätigungsziel der experimentellen Arbeit angeht. Brandes hat das in seiner Besprechung des Fechnerschen Werkes klar erkannt:

Bey den so ungemein zahlreichen Untersuchungen, zu welchen die Erfindung der Voltaschen Säule die Veranlassung gegeben hat, und die von den angesehensten Physikern unablässig fortgesetzt worden sind, läßt es sich doch nicht leugnen, daß die Zahl derjenigen Untersuchungen, die g^haue Messungen zum Gegenstande haben, nur sehr gering ist. Allerdings fand schon früh Gay-Lussac es wichtig, nach den Abmessungen der unter bestimmten Umständen in bestimmter Zeit entwickelten Gasmenge bey der Wasserzersetzung zu fragen, und eben so haben andere Physiker Maassbestimmungen für die Wärmeerzeugung und für andere Erfolge nach Verschiedenheit der angewandten Apparate zu erhalten gesucht; aber theils waren diese Versuche nur auf die Beantwortung sehr einzelner Fragen gerichtet, theils gestatteten sie auch, nach der gewählten Anordnung, nur solche Beantwortungen dieser Fragen, die dem strengen Forscher nicht ganz Genüge leisteten, und es war daher für einen sorgfältigen Beobachter noch sehr vieles zu thun übrig. ¹

Eben diese Aufgabe habe Fechner "mit Glück" erfüllt. Fechners Wunsch, "daß seine Untersuchungen beytragen mögen, um jener Arbeit von Ohm die verdiente Anerkennung zu verschaffen", werde gewiß in Erfüllung gehen.

Einen weiteren Vorzug der Theorien Fechners und Ohms sieht Brandes darin, daß sie auf ganz neue Problem-bereiche aufmerksam gemacht hätten: "Die neuen Fragen, zu denen die Versuche geleitet haben, sind als ein bedeutender Fortschritt in so fern anzusehen, als sie die Hinleitung zu ganz neuen, ohne Zweifel wichtigen, Untersuchungen enthalten."²

1) Brandes 1832, 993

2) *ibid.* 999

1832 bringt Fechner schließlich noch einmal eine Zusammenfassung der Ohmschen und seiner eigenen theoretischen Ansichten heraus in seinem "Repertorium der Experimentalphysik".¹

3.23 Weiterentwicklung

Am 30. November 1841 verlieh die Royal Society auf ihrer Jahressitzung die Copley-Medaille an Ohm. Das Werk, wofür Ohm diese hohe und geschätzte Auszeichnung erhielt, war erst im selben Jahr ins Englische übersetzt worden.² In der Begründung schrieb die Royal Society folgenden denkwürdigen Satz:

This accordance [von der Theorie Ohms mit der Erfahrung] , it may be observed, is altogether independent of the particular hypothesis which may be adopted as to the origin of the electromotive force; and obtains equally, whether that force is regarded as being derived from the contact of dissimilar metals or as referable to chemical agency.³

Diese Einschätzung genoß schon dadurch, daß sie von der Royal Society selbst stammte, hohe Autorität und wurde daher im Laufe der Zeit für große Teile der wissenschaftlichen Gemeinschaft verbindlich. Damit ist ein wichtiges konzeptuelles Hindernis für das Verständnis der Ohmschen Theorie aus dem Weg geräumt.

Jedem Wissenschaftler, der von der chemischen Hypothese herkommt, ist nun prinzipiell die Möglichkeit gegeben, Ohms Gesetz anzuerkennen und zu verwenden, ohne sich zur Kontakttheorie bekehren zu müssen.

1) Fechner 1832, Bd. I, 354ff., Bd. II, 1ff.

2) Ohm 1841

3) Proceedings of the Royal Society 4, 1841, 336 (deutsche Übersetzung Fogg. Ann. 55, 1842, 179f.)

Für die Wissenschaftlergemeinschaft ist damit ein neuer und wichtiger Schritt in eine Richtung dokumentiert, der allmählich die alten qualitativen Probleme der atomistischen und dynamistischen, kontakttheoretischen und chemischen Naturbetrachtung als irrelevant, uninteressant und/oder mit naturwissenschaftlichen Mitteln unlösbar beiseitelegt, ohne sie zu lösen oder lösen zu wollen.

Es ist bezeichnend, daß dieser erste Schritt in eine solche Richtung in England unternommen wurde. Wie wir schon oben S. 21ff. gesehen haben, war die naturwissenschaftliche Praxis in England wohl noch am stärksten jenem Teil der Baconischen Tradition verbunden, der die relativ theoriefreie Sammlung von Tatsachen als einen hohen Wert ansieht. Der allgemein pragmatische Charakter dieser Faktensuche machte es einem englischen Forscher (der normalerweise durch den Einfluß Faradays der chemischen Hypothese zuneigte) unmöglich, die praktischen Vorteile der Ohmschen Arbeiten auf die Dauer zu übersehen oder zu verdrängen, wie es einem deutschen Wissenschaftler in seiner Vorliebe für Theoretisierungen viel eher möglich war. Daher ist es auch sehr bezeichnend, wie Poggendorff in den Annalen den eben zitierten Satz der Royal Society kommentiert: "Sehr wahr; allein eben so gewiß ist, daß wie diese Theorie überhaupt Maaß und Zahl auf die Erscheinungen anzulegen lehrt, sie auch bei der

Frage über den Ursprung der galvanischen Elektrizität Anhaltspunkte gewährt, welche man ohne sie nicht besitzt."¹

Mit dieser Um- und Neudefinition des Problembereiches, die sich nicht nur in der Elektrizitätslehre sondern parallel dazu in den anderen Gebieten der Physik allmählich vollzieht, wird erstmals für die Physik konsequent die Möglichkeit eingeräumt für eine Haltung, die ich hier einmal als "funktionale Äquivalenz von Sichtweisen" bezeichnen möchte.

Diese Möglichkeit kam natürlich nicht aus heiterem Himmel, sondern hatte sich in verschiedenen Gebieten schon vorbereitet. Z.B. sahen wir im Kapitel 2.11 ein solches Gebiet in der Elektrizitätslehre: das Problem der Anzahl elektrischer Materien scheint schon vor Ohm durch Hinweis auf die funktionale Äquivalenz der widerstehenden Sichtweisen erledigt worden zu sein. Es war einem Atomisten erlaubt, je nach Kontext von zwei oder einer elektrischen Materie zu sprechen; man durfte die einfache Sprechweise der komplizierteren vorziehen.

Vor Ohm wird auch für die Lösung, (oder besser: Vermeidung) anderer Problembereiche gelegentlich diese Möglichkeit diskutiert; sie bleibt jedoch ein bloßes Lippenbekenntnis. Typisch für diese Haltung ist die folgende Äußerung des naturphilosophisch beeinflussten Physikers Erman aus dem Jahre 1820:

Es herrschen bekanntlich zwei verschiedene Vorstellungen-Weisen über den Gegensatz elektrischer Thätigkeiten. Man denkt sie sich entweder als

1) Pogg. Ann. 55, 1842, 180

bedingt durch bloße quantitative Unterschiede einer und derselben Thätigkeit, wie Temperatur und Kapacitäts-Unterschiede bei der Wärme-Thätigkeit; in der Berührung des Zinks mit Silber wird Zink gleichsam elektrisch warm, Silber elektrisch kalt. Oder es giebt zwei specifisch verschiedene Thätigkeiten, die durch kein Addiren und Subtrahiren in einander übergehen, die sich wechselseitig neutralisiren, wie die Träger von Oxygen und Basen, wenn sie nicht etwa selber die Träger sind. Beide Vorstellungsarten sind zwar nur bildliche Ausdrücke von etwas höhern, und insofern hat man die Wahl des bequemern. Man war jedoch mit Recht sehr bemüht, durch irgend eine Thatsache zu entscheiden, welches dieser Bilder die meiste Ähnlichkeit mit der zu bezeichnenden Sache habe; aber bei unzähligen Kombinationen ist nie etwas Entscheidendes gelungen. ¹

In ähnlicher Weise drückt sich 1824 C.H.Pfaff aus, wenn er die Darstellung der Phänomene selbst als "gleichgültig" für den Streit zwischen Dynamismus und Atomismus ansieht. ² Im Jahre 1840 ist die Entwicklung schon so weit fortgeschritten, daß Henrici um die "Nachsicht der Physiker" bittet, wenn er über das Auffinden des "Gesetzmäßigen" in der Natur hinaus sich auf ein "fast ganz hypothetisches Gebiet" begibt und die "tiefer liegenden Ursachen der Naturerscheinungen" aufzufinden versucht. ³

Daß die Diskussion um den Gegensatz Atomismus-Dynamismus ⁴ und ähnliche qualitative Unterschiede in naturwissenschaftlichen Sichtweisen dann doch noch bis ca. 1870 in Deutschland, allerdings in veränderter und lockerer Form, weiter geführt wird, ist wohl der Tatsache zuzuschreiben, daß besonders in der Biologie und Medizin das naturphilosophische Denken um 1840 noch weitaus lebendiger war als in der Physik. Mit DuBois-Reymonds Vortrag vor

1) Gilb. Ann. 64, 1820, 50f.

2) Pfaff 1824, 15f.

3) Henrici 1840, 124

4) Vgl. für das folgende: Engelhardt 1972

der Versammlung deutscher Naturforscher und Ärzte 1872 "Über die Grenzen des Naturerkennens"¹ ist auch hier die Diskussion zu einem gewissen Abschluß gekommen.

Die Umwandlung der Physik in theoretische Physik und damit die universelle Einführung des "phänomenalistischen Modellbegriffs" ("physical analogies", wie Maxwell sich ausdrückte) führt schließlich direkt hin zu den Auffassungen von solchen Physikern wie Gustav Robert Kirchhoff und Heinrich Hertz², die in den Vorreden zu ihren Einführungen in die theoretische Physik die radikale Konsequenz dieser Haltung am besten ausformuliert haben. Theoretische Physik liefert nur Beschreibungen und keine Erklärungen von Naturvorgängen. Der Kraftbegriff ist durch die Fassung in mathematischen Formeln sozusagen philosophisch entschärft (Kirchhoff). Die Physik beschreibt aber nicht die Wirklichkeit, sondern sie gibt Bilder der Wirklichkeit (mathematische Darstellungen, physikalische Modelle), die nur in genau definierten Hinsichten mit der Wirklichkeit übereinstimmen. Verschiedene Bilder sind austauschbar, wenn sie nur bezüglich dieser Hinsichten sich gleich verhalten (Hertz).

Doch zurück zur Weiterentwicklung der Ohmschen Theorie nach 1840. Ab dieser Zeit beginnt für die Theorie Ohms die eigentliche Phase der "normal science". J.F.Daniell, der 1836 eine der ersten konstanten voltaischen Säulen ("Daniellisches Element") konstruiert hatte, war Anhänger der chemischen Hypothese. Er war einer der

1) DuBois-Reymond 1912, 441-473

2) Kirchhoff 1876, Hertz 1894

ersten Chemiker, der Ohms Gesetz in seine Theorie integrierte. Er schildert im folgenden drei Vorzüge des Ohmschen Gesetzes, wobei besonders beim zweiten klar wird, wie sehr damals in England die praktische Anwendung des Galvanismus im Vordergrund stand:

In the first place, the beautiful law of Ohm, and the simple expression which he has given of the electromotive force and resistances of a voltaic circuit, enable me to review with advantage, and to correct, many of the conclusions which I had derived from former experiments; and have suggested additional experiments, the result of which will tend, I trust, to remove some obscurities and ambiguities which were left in my former communications.

2nd. By following out these principles I shall be enabled to offer some practical remarks upon the different forms of voltaic batteries which have been brought forward to assist the speculations of the active inquirers, who, in the present day, are so eagerly engaged in applying the voltaic forces to the service of the arts.

3rd. I wish most particularly to explain more fully the principles of the cylindrical arrangements of the battery which I have introduced, and which, appear to me to have been greatly misunderstood.

Ab 1841 gibt es über Jahre hinaus kaum eine Ausgabe von Poggendorffs Annalen, in der nicht ein Beitrag zu den von Ohm eingeführten Neuerungen aufgenommen ist. Allerdings geht die Rezeption und Abklärung der Ohmschen Theorie im engeren Sinne noch relativ zögernder vonstatten als die Bestätigung und Anwendung des Ohmschen Gesetzes auf bislang unbearbeiteten Gebieten. Kohlrausch schreibt 1849:

Bereits vor 22 Jahren machte Ohm seinen Versuch bekannt, den elektrischen Strom aus den schon länger erforschten Eigenschaften der Spannungselektrizität zu erklären. Aus den damals noch wenig bekannten Stromeigenschaften und aus einigen unvollkommenen elektroskopischen Messungen am Schließungsdrahte sehr vielgliedriger, noch dazu inkonstanter, Säulen

1) Philosophical Transactions 2, 1842, 269-287; hier 269

erschloss er unter Hinzuziehung einiger Hypothesen den elektroskopischen Zustand der einfachen Kette in allen ihren Theilen und gründete auf diesen Zustand sein Stromgesetz. Letzteres ist, weil es sich als Thatsache herausstellte, von den Physikern aller Nationen angenommen worden, die Theorie aber, auf welche es basirt ist, hat, wahrscheinlich weil unsere unvollkommenen Messinstrumente eine directe Prüfung der Behauptungen nicht zuließen, im Ganzen weniger Beachtung gefunden und wird von manchen Gelehrten als ein Aperçu zur Erläuterung des Zusammenhanges der Stromerscheinungen mit den Spannungsercheinungen betrachtet, während andere einen solchen Zusammenhang zwischen den elektroskopischen Eigenschaften der geschlossenen Kette und dem Strome gar nicht anzunehmen geneigt sind.

Wenn nun in neuerer Zeit die Mathematik in den verdienstvollen Arbeiten des Hrn. Kirchhoff auf jener Theorie fussend theils neue Gesetze ans Licht ruft, theils solche, welche auf dem Weg des Experimentes gefunden waren, mit ihr in Einklang bringt, so gewinnt die Ohm'sche Grundansicht ein neues Interesse ...

Die Arbeiten Kirchhoffs, die Kohlrausch hier anspricht, sind am fruchtbarsten speziell für dieses theoretische Gebiet. Kirchhoff verallgemeinert 1845 Ohms Theorie, die nur die eindimensionale Elektrizitätsverbreitung behandelt hatte, indem er den Stromdurchgang durch eine Ebene analysiert. Smaasen führt 1846 dasselbe für die dritte Dimension durch. Die von Ohm gelieferten Untersuchungen zur Stromverzweigung² werden von Poggendorff, Lenz und Pouillet weitergeführt. Kirchhoff stellt 1845 als 20jähriger Student in Königsberg in einer Seminaraufgabe für Franz Neumann die "Kirchhoffschen Sätze" über die Stromverzweigung auf. Sie erhalten ihre allgemeinste Formulierung in einer Arbeit von 1847, mit der Kirchhoff gleichzeitig auch einen Markstein für die Graphentheorie

1) Pogg. Ann. 78, 1849, 1f.

2) Ohm lieferte in der Arbeit "Einige elektrische Versuche" von 1827 eine Analyse der Stromverzweigung für drei parallele Leiter. s. Ohm 1892, 55ff. Siehe auch in der "Galvanischen Kette" Ohm 1892, 160ff.

setzt.¹ 1847 zeigt Helmholtz in seiner Schrift "über die Erhaltung der Kraft", daß die Energie einer Einheitsladung proportional ist zum elektrostatischen Potential an diesem Punkt. Er untersucht auch, inwieweit die Annahme einer Kontaktkraft in Voltas Kontakttheorie sinnvoll ist und findet:

Dem von uns hier durchzuführenden Princip [von der Erhaltung der Kraft] widerspricht der bisherige Begriff dieser [Kontakt-] Kraft also direct, wenn nicht die Nothwendigkeit der chemischen Processe mit in denselben aufgenommen wird.²

In derselben Arbeit wird das Ohmsche Gesetz auch auf die elektromagnetische Induktion erweitert und zwar in der

Form:
$$I = \frac{A - \frac{1}{a} \frac{du}{dt}}{W} \quad , \text{ wobei } a \text{ "das mechanische Äquivalent der Wärmeeinheit" (Helmholtz) ist. In}$$

moderner Form würden wir schreiben:

$$I = \frac{U - L \frac{dI}{dt}}{R} \quad \text{oder} \quad U = R \cdot I + L \frac{dI}{dt}$$

wobei L die Induktivität bedeutet.³

1849 schließlich identifiziert Kirchhoff die "elektroskopische Kraft" Ohms als elektrostatisches Potential. Sein Wunsch war es, für die oben erwähnten Messungen, die Kohlrausch 1849 mit dem Elektrometer am geschlossenen Stromkreis durchgeführt hat, eine "befriedigende Theorie" zu geben und den Widerspruch zwischen Elektrostatik und den von Ohm gemachten Annahmen aufzuheben. Ohm habe angenommen, "daß die Elektrizität in einem Leiter sich in

1) Pogg. Ann. 72, 1847, 497-508. Die graphentheoretische Leistung würdigt Biggs 1976, 131ff.

2) Helmholtz 1847, 35

3) vgl. Unger 1939

Ruhe befindet, wenn sie den Rauminhalt desselben mit gleichmäßiger Dichtigkeit erfüllt."¹ Die Elektrostatik nehme aber an, daß sich die Elektrizität auf der Oberfläche eines Leiters anordne. Aus der Identifizierung von "Spannung" mit "Potentialdifferenz" folgt,

daß auch bei der geschlossenen Kette freie Elektrizität sich nur auf der Oberfläche der Leiter befinden kann. Da nämlich u innerhalb eines Leiters der Differentialgleichung

$$\frac{d^2u}{dx^2} + \frac{d^2u}{dy^2} + \frac{d^2u}{dz^2} = 0$$

genügt, so muß u ein Potential von Massen seyn, die außerhalb dieses Leiters liegen; u ist aber das Potential allerfreien Elektrizität; von dieser kann also kein Theil im Innern jenes Leiters, also überhaupt² nicht im Innern irgend eines der Leiter liegen.

Diese kurze Arbeit Kirchhoffs beschäftigte die Theoretiker der Elektrizität noch lange.³ Es scheint, daß der Gebrauch der Begriffe Potentialdifferenz, Spannung und Dichtigkeit des Stromes lange Zeit nicht völlig einheitlich war. Besonders die Verbindung der theoretischen Begriffe mit praktischen Versuchen scheint einige Schwierigkeit bereitet zu haben. Da sich in dieser Tatsache noch die Ohmsche Veränderung des alten Begriffs der "Intensität" oder "Spannung der Kraft" widerspiegelt, sei ein längeres Zitat aus dem Vorwort einer Habilitationsarbeit "Über die physikalische Bedeutung der Potential-Funktion in der Elektrizitätslehre" von 1861 gebracht, in dem von den genannten Unsicherheiten gesprochen wird:

1) Pogg. Ann. 72, 1849, 506 - 513, hier 506

2) ibid. 511

3) vgl. z.B. Clausius 1879, 131ff.

Alle eingehenderen theoretischen Untersuchungen auf dem Gebiete der Elektrostatik, und dem damit verwandten Uebergangsgebiete zwischen Elektrostatik und Elektrodynamik wurden bis jetzt nur unter Anwendung aller Mittel der höheren Analysis geführt.

Seit den Arbeiten von Green und Gauss war das Hauptaugenmerk dabei stets der Auffindung der Potentialfunktion zu gewendet, weil man durch deren Kenntniss in den Stand gesetzt ist, alle in Frage kommenden Größen mit Leichtigkeit zu bestimmen, und die Fundamentalbedingung für das elektrische Gleichgewicht sich einfach als die der Constanz jener Funktion für die ganze Oberfläche des Leiters darstellen lässt.

Da jedoch niemals der Versuch gemacht wurde, der letzteren eine physikalische Deutung zu geben ^{*)}, so

Anmerkung ^{*)} Es kommen zwar bei Kirchhoff und Clausius ein paar Bemerkungen vor, welche die Verwandtschaft dieses Begriffes mit dem der Spannung andeuten, und auch der Verf. hat in einer früheren Arbeit nachgewiesen, dass man im Kohlrausch'schen Sinus-elektrometer ein Mittel besitze, um den Potentialwerth zu messen, zu welchem ein System geladen ist; doch sind diess alles nur Andeutungen des Gegenstandes, der hier weiter ausgeführt werden soll.

war es natürlich, dass man bei theoretischen Entwicklungen in Lehrbüchern der Experimentalphysik und überhaupt in allen mehr experimentellen Arbeiten dieses rein mathematische Element vermied, und selbst bei sachlich gleichen Fragen einen ganz anderen Weg der Behandlung einschlug.

Sogar die Terminologie ist eine andere; man spricht von Spannung, von freier und gebundener Elektricität u.s.w., Worte, die den rein mathematischen Untersuchungen über dieselben Gegenstände gar nicht vorkommen.

Oft wird es schwer, mit den eben erwähnten Ausdrücken einen klaren Sinn zu verbinden, besonders das Wort "Spannung" entbehrt eines solchen in höherem Maasse, als vielleicht irgend eines im physikalischen Sprachgebrauche.

Denn eines Theils bedient man sich desselben da, wo man eigentlich von elektrischer Dichtigkeit sprechen sollte, anderen Theils braucht man es in einem hievon ganz verschiedenen Sinne.

Man sagt z.B. von zwei geladenen Franklin'schen Tafeln, welche nacheinander mit einem Elektrometer verbunden, demselben die gleichen Ausschläge ertheilen, die Elektricität habe auf beiden die gleiche Spannung; während die elektrische Dichtigkeit in diesem Falle eine sehr verschiedene sein kann. ¹

1) Bezold 1861, 3f.

1888 wird schließlich Ohms Gesetz von Galileo Ferraris auch auf die kapazitiven Erscheinungen in der heute gebräuchlichen Form erweitert:

$$U = R \cdot I + L \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} \int I \cdot dt$$

wo C die Kapazität bedeutet.¹⁾

Seit Ohm hat man die elektromotorische Kraft einer Stromquelle immer nur unter Zugrundelegung des Ohmschen Gesetzes gemessen. Bei jeder Messung wurde also die Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes oder sogar der Kirchhoffschen Sätze vorausgesetzt. Dies erschwerte natürlich die Annahme des Gesetzes noch zusätzlich. Erst Kohlrausch hat in der genannten Arbeit Elektrometermessungen am geschlossenen Stromkreis durchgeführt. Erst nach der Identifizierung von elektrostatischen und elektrodynamischen Messungen in Wilhelm Webers "allgemeinem Grundgesetz der elektrischen Wirkung" von 1846² und nach der Zurückführung der Elektrizitätsgrößen auf mechanisches Maß durch Weber und Kohlrausch 1856³ kann gerechtfertigt werden, daß die Messung der elektromotorischen Kraft einer Stromquelle auch ohne Rückgriff auf Ohms Gesetz durchgeführt werden kann.⁴

1) Unger, 1939

2) Weber 1846

3) Weber & Kohlrausch 1856

4) Näheres zur weiteren Geschichte des Ohmschen Gesetzes bei Wiedemann 1893, Unger 1939, Beetz 1849

4. Logische Rekonstruktion und philosophische Einschätzung

4.1 Interner wissenschaftlicher Fortschritt in der Sicht der traditionellen Geschichtsschreibung

In der traditionellen Geschichtsschreibung der Wissenschaftsgeschichte wird, wie schon öfters erwähnt, die Einführung des Ohmschen Gesetzes fast ausnahmslos als eine geradlinige, bruchlose und kumulative Ergänzung des damals schon vorhandenen Wissens von der Elektrizitätslehre dargestellt. Ohms Gesetz erscheint wie das Stück eines Puzzle-Spiels, mit dessen Hilfe man das vor Ohm bestehende Bild von der Elektrizität und ihren Erscheinungen an einer wichtigen Stelle ergänzt und vervollständigt. Eine solche Sicht findet sich beispielsweise bei Whittaker, der hier stellvertretend für viele ähnliche Einschätzungen zitiert werden soll. Whittaker geht davon aus, daß Ohm die Theorie und die Versuche Davys ausgeweitet hat durch einige einfache Versuche und Überlegungen. Vom modernen Standpunkt her gesehen erscheinen also Davys Versuche und ihre Deutungen als gut und korrekt. Jedoch hatte ihnen eine Unvollständigkeit an, die erst Ohm beseitigt habe:

The current which flows in a given Voltaic circuit evidently depends not only on the conductor which forms the circuit [wie Davy gezeigt hat] , but also on the driving power of the battery. In order to form a complete theory of Voltaic circuits, it was therefore necessary to extend Davy's laws by taking the driving power into account. This advance was effected in 1826 by Georg Simon Ohm. ¹

Gemäß einer solchen Sicht soll sich also das Ohmsche

1) Whittaker 1951, 90. Auch Hoppe 1884, 222f. & 176, das noch immer ein Standardwerk der Geschichte der Elektrizitätslehre darstellt, kommt zu ähnlicher Ansicht.

Gesetz, gleichsam mühelos und automatisch, aus den durchgeführten Versuchen ergeben haben.¹ Wenn man diese Voraussetzung akzeptiert, dann stellen sich verschiedene Fragen, die beantwortet werden müssen: Warum hat es nach der ersten Konstruktion der Voltaschen Säule im Jahre 1799 so lange gedauert, bis das Ohmsche Gesetz 'entdeckt' wurde? (In anderen Fällen wurden ja wichtige Entdeckungen sehr schnell gemacht: William Nicholson und Anthony Carlisle z.B. haben schon sechs Wochen nach dem berühmten Brief Voltas an Joseph Banks (Abgedruckt in den Philosophical Transactions 1800) die erste chemische Zersetzung von Wasser mithilfe der Voltaschen Säule durchgeführt.) Warum wurde das Ohmsche Gesetz und Ohms Theorie von der Wissenschaftlergemeinschaft im großen und ganzen ca. 15 Jahre lang ignoriert und/oder nicht anerkannt? Warum wurde es von einigen anerkannten Wissenschaftlern sogar bekämpft? Auf die erste Frage finden sich in der Geschichtsschreibung keinerlei Hinweise auf eine Antwort. Zur Beantwortung der zweiten Frage, sowie der dritten, werden ständig die vermeintliche Dummheit und der Irrationalismus von Naturphilosophie und Dynamismus herangezogen.² Forscher, die wie Poggendorff und J.W.A. Pfaff, Fechner und Jacobi frühzeitig Ohms Leistung anerkannten, werden dann folgerichtig als die weitblickenden und scharfsinnigen Heroen beschrieben, die den rationalen und wissenschaftlichen Geist der wahren Physik bekunden.

-
- 1) Vor allem McKnight 1967 und 1968 vertritt diese baco-nisch-induktivistische Auffassung.
 - 2) z.B. Gerlach 1960, Winter 1944, Hartmann 1927, Lommel 1892. Auf der Ohm-Gedächtnisfeier 1939 in Berlin machte man sich, wie Winkler 1939, 454 berichtet, sogar lustig über die Gegner Ohms, indem man einige Abschnitte aus Pohls Rezension 1228 verlas.

Dieser Legendenbildung liegt eine Sicht von der internen Geschichte der Naturwissenschaft zugrunde, die Bachelard einmal als "rückläufige Geschichte" bezeichnet hat, "die von der Finalität der Gegenwart erhellt wird." ¹ Es wird nämlich suggeriert, daß Theorien, die einer neuen Theorie vorangehen (z.B. Davys Theorie als Vorgängertheorie zu Ohm) "ein wenig geschmeidiger gemacht, die Neuigkeit hätten voraussehen müssen." ¹ Dadurch wird in den historischen Darstellungen eine "rückläufige Fruchtbarkeit" der Ohmschen Theorie zur Schau gestellt, die ihr garnicht zukommt.

Dieser Art von Geschichtsbetrachtung liegt eine Theorie von der Wissenschaft zugrunde, die aus dem unreflektierten Fortschrittsglauben des 19. Jahrhunderts erwachsen ist. Der interne wissenschaftliche Wandel wird als das Wechselspiel zwischen kumulativem Fortschritt und Ausmerzung falscher Hypothesen gesehen. Dieses Bild vom wissenschaftlichen Wandel erscheint sehr undifferenziert und eindimensional.²

In den letzten zwei Jahrzehnten ist diese naive Sicht in zunehmendem Maße der Kritik unterzogen worden, sowohl von wissenschaftshistorischer als auch wissenschaftstheoretischer Seite. Aus dieser Kritik sind Ansätze entstanden, die ein wesentlich differenzierteres und philosophisch reflektierteres Bild vom Wandel naturwissenschaftlichen Wissens zugrundelegen.

1) Bachelard 1974, 215 und 122.

2) Thomas Kuhn hat in 1962, Kapitel XI, die Motive für diese Art von Geschichtsschreibung, "welche systematisch die Existenz und Bedeutung wissenschaftlicher Revolutionen verschleiert" (147), ausführlich analysiert.

In der vorliegenden Darstellung des Wandels der Elektrizitätslehre wurde versucht, jede rückläufige Sicht der Geschichte zu vermeiden. Es wurde zunächst mehr Wert darauf gelegt, die historischen Aspekte der Wissenschaftsentwicklung darzustellen, obwohl unschwer zu erkennen sein wird, daß auch in dieser mehr deskriptiven Darstellung ein dezidiert wissenschaftstheoretischer Standpunkt enthalten ist. Im folgenden soll dieser Standpunkt explizit bewußt gemacht werden und in eine logische Rekonstruktion zumindest von Teilaspekten des wissenschaftlichen Wandels münden. Dies wird in mehreren Schritten geschehen. Als Ausgangspunkte werden dabei die Metatheorien von Kuhn und von Sneed gewählt:

1. Es wird in der Metatheorie Kuhns untersucht, auf welchen Ebenen wissenschaftlicher Wandel ablaufen kann und mit welchen Kategorien er in Kuhns Theorie beschreibbar ist;
2. Es werden die verschiedenen Aspekte des Wandels der Elektrizitätslehre zu Ohms Zeit, wie sie in der vorliegenden Arbeit dargestellt worden sind, zusammengefaßt;
3. Es wird untersucht, inwieweit die unter 1. gewonnenen begrifflichen Hilfsmittel auf 2. anwendbar sind;
4. Der von Sneed und Stegmüller explizierte Begriff der wissenschaftlichen Revolution wird analysiert und verbessert;
5. Die unter 3. gewonnenen Aspekte im Wandel der Elektrizitätslehre werden mithilfe von Sneeds Theoriendynamik und der Verbesserung unter 4. logisch rekonstruiert.

4.2 Wissenschaftlicher Wandel in Kuhns Metatheorie

Wie schon dargelegt, wird von der traditionellen Auffassung die interne wissenschaftliche Entwicklung einerseits als kumulatives und kontinuierliches Anwachsen von Wissen gesehen, andererseits als das Ausmerzen von empirisch falsifiziertem Wissen. Alle Vorgänge, die von diesem Bild abweichen, werden a priori in den Bereich der externen Einflüsse auf die Wissenschaft verbannt und als unwissenschaftliche menschliche Schwächen, die manchmal durchaus verständlich erscheinen, bewertet.

Thomas Kuhns Konzeption von der Entwicklung der Naturwissenschaft ist in bewußtem Gegensatz zu dieser Auffassung entstanden. Zwei Merkmale sind im wesentlichen für diesen Gegensatz verantwortlich. Grob ausgedrückt sind das folgende:

- (1) Die Kuhnsche Metatheorie verwirft das bislang von der Wissenschaftstheorie vertretene Aussagenkonzept von Theorien und ersetzt es stattdessen durch ein strukturalistisches Theorienkonzept.
- (2) Kuhn sieht die Geschichte der Naturwissenschaft strukturiert in periodisch aufeinander folgenden Phasen der Wissenschaftsentwicklung, die wohldefinierte Unterschiede besitzen.

Zu (1): Einführung des strukturalistischen Theorienkonzepts. Nach den gängigen wissenschaftstheoretischen Auffassungen wurde unter einer wissenschaftlichen Theorie im formalen Sinn eine Menge von Aussagen verstanden, die

auf eine ganz bestimmte Weise von einander abhängen. Im Idealfall ist die Theorie axiomatisiert, d.h. sie besteht aus der Menge aller Aussagen, die aus den Axiomen ableitbar sind. Stattdessen wird eine Theorie nun als eine begriffliche Struktur gesehen: als ein Prädikat, das man physikalischen Entitäten zu- oder abspricht. Die empirischen Aussagen einer Theorie sind demnach Behauptungen z.B. von der Art "c ist ein Ohmscher Stromkreis", wobei durch das Prädikat "Ohmscher Stromkreis" die ganze axiomatisch charakterisierte mathematische Struktur der Ohmschen Theorie zur Geltung gebracht wird. Die formalen Formulierungen für ein solches Theorienkonzept wurden zwar schon früher von Suppes, Adams u.a. angegeben. Erst durch Kuhn ist aber die Relevanz des "non-statement-view" klar geworden.¹ Kuhn hat außerdem noch diesen Theorienbegriff dadurch verschärft und auf tatsächlich in der Physikgeschichte vorkommende Theorien anwendbar gemacht, daß er die Menge der paradigmatischen Anwendungen einer Theorie in den Theorienbegriff mit hineinnimmt. Unter den paradigmatischen Anwendungen einer Theorie versteht man eine kleine Anzahl modellhafter kanonischer Anwendungen, die gewöhnlich vom Begründer einer Theorie vorgelegt worden sind und auf die späteren Anhänger der Theorie die größte Überzeugungskraft ausüben. Sneed und Stegmüller haben den Theorienbegriff von Kuhn im Anschluß an Suppes u.a. logisch rekonstruiert und damit auch für die Wissenschaftstheorie fruchtbar gemacht.

1) Stegmüller 1976, 149: "at the bottom of Kuhn's thesis lies a theory concept which is totally different from the one then current among philosophers of science."

Warum ergibt sich hier ein entscheidender Unterschied zum traditionellen Bild des wissenschaftlichen Wandels? Nach dem Aussagenkonzept müssen wir schon dann von einer neuen Theorie reden, wenn wir zu einer, eine bestimmte Theorie darstellenden, Menge von Aussagen eine einzige neue Aussage hinzunehmen. Im strukturalistischen Konzept muß hingegen nur dann von einer neuen Theorie geredet werden, wenn entweder die begriffliche Grundstruktur geändert wird oder die Menge der paradigmatischen Anwendungen verkleinert wird. Eine modifizierende Hinzunahme, sowohl von begrifflichen Elementen zur Grundstruktur als auch von Anwendungen zur Paradigmamenge zwingt uns nicht, von einer neuen Theorie zu sprechen. Durch Kuhns und Sneys Identitätskriterium für naturwissenschaftliche Theorien werden Theorien dynamisierbar gemacht: Die Geschichte einer Theorie kann nun zur Geschichte von wenigen, wohlbegrenzten Überzeugungen und deren erfolgreicher oder gescheiterter Erweiterungen werden. Nach dem Aussagenkonzept ist die Geschichte einer Theorie die Geschichte von Bruchstücken, die sich erst immer jeweils in der Gegenwart des Historiographen zu einem Ganzen vereinen, oder die Geschichte eines Torsos, der erst in der Gegenwart seine Vollendung erhält.

Zu (2): Strukturierung der Geschichte in Phasen. Die durch das strukturalistische Theorienkonzept möglich gewordene Dynamisierung von Theorien würde für eine einigermaßen adäquate und realistische Anwendung auf die

tatsächliche Geschichte der Naturwissenschaft noch nicht ausreichen. Geschichte ist nicht nur Geschichte der Modifikation einer Theorie, sondern die Geschichte vieler Theorien, die nacheinander auftauchen. Kuhn sieht dementsprechend die Geschichte der Naturwissenschaft als die Abfolge von unterschiedlichen Theorien, wobei sich Zeiten der Modifikation einer Theorie und Zeiten des Verdrängens einer Theorie durch eine andere gegenseitig ablösen. Diese Veränderungen sind nicht als willkürliche Geschehnisse interpretiert, die unmotiviert auftreten können, sondern werden durch eine spezielle Typologie für die Ordnung der Phasen der Naturwissenschaftsgeschichte erklärt.

In einer ersten, prätheoretischen Phase kann sich die Wissenschaftlergemeinschaft noch nicht einigen, welche Grundüberzeugungen und welche empirische Gegebenheiten sie als modellhaft und verbindlich für ihre Wissenschaft anerkennen will und welche nicht. Die Wirklichkeit erscheint heterogen und vordergründig; es herrscht eine Inflation von Theorienansätzen. In der darauffolgenden Phase der normalen Wissenschaft lassen sich die Wissenschaftler von gemeinsamen strukturellen (in der Physik idealerweise mathematischen) Grundüberzeugungen leiten, die selbst nicht mehr Prüfungen unterworfen werden. Die Überzeugungen werden im Gegenteil dazu benutzt, die Menge der paradigmatischen Entitäten, auf die die Theorie anfangs anwendbar ist, auszuweiten, indem man Verfeinerungen

und Spezialisierungen einführt. Die Menge der eine Normalwissenschaft charakterisierenden Grundüberzeugungen, sowie die Menge der Entitäten, von denen man am Anfang der normalen Wissenschaft glaubt, daß sie sich unter die postulierten Überzeugungen subsumieren lassen, wurde von Kuhn anfangs "Paradigma", später "disziplinäres System" (disciplinary matrix) genannt. Sneed und Stegmüller haben diese Elemente in ihrer Rekonstruktion als Strukturkern einer Theorie und Menge der paradigmatischen intendierten Anwendungen einer Theorie bezeichnet.

Nach einer Zeit erfolgreichen Lösens von Problemen stößt die normale Wissenschaft irgendwann einmal an eine Grenze: die überkommenen Methoden beginnen zu versagen, die Verfeinerungen und Spezialisierungen sind nicht mehr so erfolgreich wie früher, die Kriterien, nach denen man bislang entschieden hat, ob man etwas als erfolgreiche Anwendung der Theorie bezeichnen soll, werden immer unstrittener und versagen; kurz, das verstärkte Auftreten von Anomalien führt zu einer Krise, die Phase der revolutionären Wissenschaft hat eingesetzt. Am Ende dieser Phase steht das Auftauchen einer neuen Grundüberzeugung, die für eine neue Gemeinschaft von Wissenschaftlern verbindlich ist. Die Verdrängung der Theorie der alten normalen Wissenschaft zugunsten der neuen Theorie geht einher mit einer Änderung sowohl der begrifflichen Mittel, deren sich die Wissenschaftler bei der Formulierung ihrer Theorie bedienen, als auch der Sichtweisen, unter denen der Anwendungsbereich

organisiert erscheint, sowie der Methoden, die die Forschung anwendet.

Schon aus dieser Skizzierung geht hervor, daß die Kuhnsche Metatheorie wesentlich differenziertere Möglichkeiten für die Beschreibung des internen wissenschaftlichen Wandels zuläßt als die traditionelle Metatheorie. Im folgenden soll ein Versuch unternommen werden, diese Möglichkeiten zu beschreiben und systematisch zu klassifizieren.

Es ergeben sich vier verschiedene Gruppen:

I Wandel im Prozeß der Reifung einer Theorie

II Wandel der gegenseitigen Abhängigkeit und
Beziehung von Theorien untereinander

III Normalwissenschaftlicher Wandel

IV Revolutionärer Wandel

Zu I : Wandel im Prozeß der Reifung einer Theorie. Wenn man einmal von allen Modifikationen absieht, die im normalwissenschaftlichen Forschungsprozeß an einer Theorie angebracht werden können, so bleibt die Theorie sich nicht unbedingt gleich. Der Wandel, der hier zusätzlich und unabhängig vom normalwissenschaftlichen Wandel ins Auge gefaßt wird, betrifft die verschiedenen Möglichkeiten, in welcher Form eine Theorie formuliert werden kann. Es ist zum Beispiel für eine physikalische Theorie typisch, daß der Grad ihrer Mathematisierung mit ihrem Alter ansteigt und daß die Definitionen ihrer Grundbegriffe ebenfalls mit steigendem Alter spezifischer werden, usw. Im Gegen-

satz zu dem normalwissenschaftlichen Wandel wird durch die hier angesprochene Art von innerwissenschaftlichem Wandel die Menge der intendierten Anwendungen nicht vergrößert. Es wird also behauptet, daß sich die "existierenden Darstellungen einer Theorie" ¹ im Laufe der Theoriengeschichte auf eine charakteristische Weise verändern. Folgende Typen der Veränderung sind möglich:

- I.1 Übergang von einer nicht-mathematisierten Theorie zu einer mathematisierten Theorie
- I.2 Übergang von einer nicht-axiomatisierten Theorie zu einer axiomatisierten Theorie
- I.3 Neudefinitionen von Grundbegriffen der Theorie
- I.4 Übergang von einer modifizierbaren Theorie zu einer abgeschlossenen Theorie
- I.5 Die Entstehung eines krisenhaften Zustandes einer Theorie

Weitere Möglichkeiten sind sicher denkbar.

Unter der Neudefinition von Grundbegriffen einer Theorie (I.3) verstehe ich Vorgänge wie z.B. die Neudefinition des Ohmschen Begriffes der "elektroskopischen Kraft" als "Potentialdifferenz" durch Kirchhoff (s.o.S. 157). Die Ohmsche Theorie bleibt, sozusagen, konstant, die Interpretation eines Grundbegriffs ändert sich jedoch entscheidend. Zwar ist diese Änderung hauptsächlich im Hinblick auf das Verhältnis der Theorie Ohms zu anderen Theorien entstanden (Elektrostatik; Energieerhaltungssatz) und fällt damit wenigstens zum Teil in die nächste Kate-

1) Dieser Begriff spielt in der Definition von T-theoretisch eine wichtige Rolle bei Sneed und Stegmüller. Siehe Stegmüller 1973, 47ff

gorie (II), doch ist der wesentliche Teil der Änderung ein innertheoretischer, der sich auf den Theorienkern beschränkt.

Der Begriff der abgeschlossenen Theorie (I.4) stammt von Werner Heisenberg.¹ Er versteht darunter solche Theorien, die durch kleinere Modifikationen nicht mehr verbessert werden können und auch nach wissenschaftlichen Revolutionen ihre Verbindlichkeit, wenn auch in eingeschränktem Maße, beibehalten. Paradebeispiel dafür ist die Newtonsche Mechanik, die nicht wie viele andere physikalische Theorien als vorläufig akzeptiert wird, sondern im Bewußtsein der Physiker für einen bestimmten Bereich schon einen klassischen ("kanonischen") Status angenommen hat, an dem nichts mehr geändert wird. Hier kommt ein konventionalistisches Moment zum Tragen: man verabredet, die Theorie für bestimmte Bereiche als endgültig anzusehen. Auch eine wissenschaftliche Revolution wie die Einsteinsche hat die Newtonsche Mechanik nicht aus den Lehrbüchern verbannt. (Vgl. die schon früh erfolgte Entscheidung der französischen Akademie, keine Arbeiten über die Konstruktion eines perpetuum mobile mehr anzunehmen.)

Zu II : Wandel der gegenseitigen Abhängigkeit von Theorien.- Wie schon angesprochen wurde, werden innertheoretische Veränderungen manchmal deswegen vorgenommen, um intertheoretische Beziehungen von Theorien innerhalb einer Wissenschaft zu verändern. Dieser intertheoretische

1) Heisenberg 1971, 37ff

Wandel betrifft zwei große Bereiche: das Verhältnis einer Theorie zu ihrer Meßtheorie und die Relation einer Theorie zu allen übrigen naturwissenschaftlichen Theorien. Es ergeben sich dadurch (mindestens) folgende Typen:

II.1 Meßtheoretische Relationen:

- 1.1 Einführung einer Meßtheorie T1 für eine vorhandene Theorie T2
- 1.2 T1 wird anstelle von T2 als Meßtheorie zu T3 zugrundegelegt
- 1.3 Die Meßtheorie T1 wird mit einer Meßtheorie T2 in ein gemeinsames Maßsystem gebracht

II.2 Sonstige intertheoretische Relationen:

- 2.1 T1 wird mit T2 verschmolzen
- 2.2 T1 wird von T2 abgespalten
- 2.3 T1 wird auf T2 reduziert

In Abweichung der bei Sneed und Stegmüller eingeführten Definition soll hier der Begriff der Meßtheorie etwas weiter gefaßt werden. Bei Sneed/Stegmüller wird unter einer Meßtheorie ein (meist extensives) Skalensystem verstanden, das u.a. eine nichtmetrische Relation R und eine nichtmetrische Kombinationsoperation o enthält. Eine physikalische Theorie darf jedoch per definitionem nur numerische Funktionen enthalten. Um die Anwendung auf den historischen Fall bequemer zu gestalten, sollen unter Meßtheorien einer Theorie T all diejenigen Theorien verstanden werden, die für die Messung bzw. Berechnung der

physikalischen Funktionen aus T benutzt werden müssen. (Muß man auf T selbst zurückgreifen bei der Messung einer Funktion, wie das bei den T-theoretischen Größen notwendig ist, so soll T nicht selbst seine eigene Meßtheorie genannt werden.) Dieser Begriff der Meßtheorie umfaßt also Meßtheorien im früheren Sinne, sowie alle diejenigen Theorien, die evtl. zwischen die Meßtheorie im engeren Sinne und der zur Diskussion stehenden physikalischen Theorie T in der Theorienhierarchie dazwischengeschaltet sind. So ist zum Beispiel für Coulombs Messung der elektrostatischen Kraft durch eine Drehwaage ein Gesetz über die Torsionskräfte, die am gedrehten Faden auftreten, erforderlich, sowie ein extensives Skalensystem, das den Größen aus diesem Torsionsgesetz eine Skala zuordnet.

Neben der meßtheoretischen Abhängigkeit gibt es noch weitere intertheoretische Relationen. Im Laufe der geschichtlichen Entwicklung einer Theorie kann es geschehen, daß diese Theorie mit einer anderen Theorie verschmolzen wird. So hat z.B. Wilhelm Weber 1846 ein "Grundgesetz" der elektrischen Wirkung aufgestellt, das das Coulombsche elektrostatische Grundgesetz, das Ampéresche elektrodynamische Grundgesetz, sowie die Gesetze der Induktion, zu einem einzigen Gesetz zusammenfaßt. Zwar war man immer davon überzeugt, daß alle drei Gesetze mit der Elektrizität zu tun haben, aber es war bisher nicht gelungen, elektrostatische und elektrodynamische Kraftwirkungen in ein und derselben Theorie zu beschreiben.

In einer Theorienverschmelzung werden also Individuenbereiche, die bisher heterogen waren, in einem homogenen Bereich zusammengefaßt. In manchen Fällen, wie z.B. bei Webers Theorie, ist diese Homogenisierung hochwillkommen, weil man aus anderen Gründen schon immer von der Homogenität der Individuenbereiche überzeugt war.

Nun kann auch noch der Fall eintreten, daß eine Theorie T1 sich von einer anderen T2 abspaltet (II.2.2): eine Art von Wandel, die man als "quasi-revolutionär" bezeichnen kann. In einem solchen Fall wird für bestimmte physikalische Systeme, die bislang als erfolgreiche Anwendungen der Theorie T2 galten, eine neue Theorie T1 entworfen, für die sie nun Teil der paradigmatischen Anwendungsmenge werden. Außerdem werden diese Systeme nicht mehr als erfolgreiche Anwendungen der alten Theorie angesehen. Bis zu diesem Punkt käme diese Art Wandel einer wissenschaftlichen Revolution gleich. Im Unterschied zu einer tatsächlichen Revolution wird jedoch bei einer solchen Abspaltung die Theorie T2, von der T1 abgespalten wurde, nicht zugunsten von T1 aufgegeben, sondern weiterhin für die Anwendung auf diejenigen physikalischen Systeme als erfolgreich angesehen, die nicht abgespalten worden sind.

Der dritte Fall (II.2.3) ist der Fall der Reduktion einer Theorie auf eine andere. Bei diesem Typ des wissenschaftlichen Wandels wird eine neue Theorie eingeführt, bei der gezeigt wird, daß alle physikalischen Systeme,

die erfolgreiche Anwendungen der alten Theorie darstellen, ebenfalls zur intendierten und erfolgreichen Anwendungsmenge der neuen Theorie gehören. Außerdem sollen alle Erklärungs- und Systematisierungsleistungen der alten Theorie auch in der neuen Theorie erbracht werden können.

Zu III : Normalwissenschaftlicher Wandel. Unter dieser Art von Wandlungstyp werden zweierlei Arten von Aktivitäten des Naturwissenschaftlers subsumiert:

III.1 Die erfolgreiche Anwendung der Theorie auf ein physikalisches System, das bisher noch nicht als Anwendung der Theorie galt; also Vergrößerung der Menge der intendierten Anwendungen einer Theorie

III.2 Die Spezialisierung und Verfeinerung der Theorie durch die Annahme zusätzlicher spezieller Gesetze, die die theoretische Grundüberzeugung der Theorie für spezielle Klassen von Anwendungen modifizieren, sowie die Preisgabe solcher Gesetze unter falsifizierenden Bedingungen.

Diese zweite Art von normalwissenschaftlichem Wandel kommt noch am ehesten dem Wandlungstyp gleich, den die traditionelle Geschichtsschreibung zum universellen wissenschaftlichen Wandlungstyp emporstilisiert hat.

Zu IV : Im Gegensatz zum normalwissenschaftlichen Wandel bleiben beim revolutionären Wandel diejenigen Elemente, die das Wesen der Theorie und ihre Anwendungs-

weise konstituieren, nicht erhalten, sondern werden durch neue verdrängt. Der revolutionäre Wandel ist in der Kuhnschen Metatheorie der umstrittenste Wandlungstyp, der die meisten Fragen aufgeworfen hat.

In Kuhns Metatheorie kann man zwei Arten von Revolutionen unterscheiden: 1. den Übergang von einer oder mehreren vorparadigmatischen "Prätheorien" zu einer paradigmatischen Theorie, 2. die Verdrängung einer normalwissenschaftlichen Tradition durch eine andere. Im folgenden sollen einige Bedingungen zusammengestellt werden, die für diese beiden Arten von Revolutionen relevant sind und in einer Explikation des Revolutionsbegriffs berücksichtigt werden müssen. Es bleibt dabei noch offen, um welche Art von Bedingungen es sich handelt: ob sie notwendig oder hinreichend sind:

IV.1 Erste Art von Revolution: Übergang von einem vorparadigmatischen prätheoretischen Zustand zu einer paradigmatischen Theorie:

- 1.1 Erstmalige Einführung einer Maßtheorie im engeren Sinne für einen bestimmten Bereich
- 1.2 Erstmalige Einführung eines Grundgesetzes für einen bestimmten Bereich
- 1.3 Erstmalige erfolgreiche Anwendung der Theorie auf eine kleine Menge von physikalischen Systemen

IV.2 Zweite Art von Revolution: Die Theorie T wird zugunsten einer anderen, von T verschiedenen, Theorie T' verdrängt:

- 2.1 Das Grundgesetz von T wird abgelöst von einem neuen Gesetz der Theorie T'
- 2.2 Die Sichtweise, unter der die Anwendungen einer Theorie erscheinen, wird zugunsten einer neuen, radikal verschiedenen, Sichtweise verdrängt.
- 2.3 Die Begriffe (theoretische und T-nicht-theoretische Funktionen), die in einer Theorie vorkommen, werden ersetzt durch neue, andere Begriffe.
- 2.4 Die Methoden der Forschung und des Experimentierens werden durch neue Methoden ersetzt.
- 2.5 Die Kriterien wandeln sich, mit deren Hilfe entschieden wird, ob ein physikalisches System eine erfolgreiche Anwendung einer Theorie darstellt oder nicht.

4.3 Neun Ebenen, auf denen sich die Elektrizitätslehre zu Ohms Zeit wandelt

Im folgenden Abschnitt werden die verschiedenen Ebenen des Wandels der Elektrizitätslehre zu Ohms Zeit auf eine Art und Weise zusammengefaßt, die es ermöglicht, sie mithilfe der in 4.2 erarbeiteten Kuhnschen Kategorien zu analysieren und in einem weiteren Schritt in Sneed's Metatheorie zu rekonstruieren.

1. Weltanschauliche Ebene (Von der "Wesens-Physik" zur theoretischen Physik). - In Deutschland gab es zur Zeit von Ohm in der Elektrizitätslehre zwei Hauptrichtungen, den Atomismus und den naturphilosophischen Dynamismus. Die Atomisten versuchten die elektrischen Phänomene mit der Annahme zu erklären, daß Elektrizität ein "imponderabler" Stoff sei aus feinsten Atomen, während die Dynamisten diese These ablehnten und sich die Elektrizität als Wirkung von einer oder von mehreren Kräften erklärten. Die Atomisten selbst waren wieder in zwei Lager geteilt, was ihre Erklärungen der Elektrizitätsentstehung in der Volta'schen Säule anlangte. Die einen erklärten die Säule im Anschluß an Volta rein kontakttheoretisch, die anderen chemisch. So scharf die Auseinandersetzungen zwischen Atomisten und Dynamisten, Kontakttheoretikern und Chemikern auch waren, so ist ihnen doch eine Haltung gemeinsam, die erst von der beginnenden theoretischen Physik abgelöst wurde. Für die genannten Schulen bestand

das Ziel der Physik darin, die Ursache, das Wesen, die Natur der Elektrizität zu erklären. Daran änderte auch die Tatsache nichts, daß die Baconische Hoffnung, man könne die Elektrizität einmal "in ihrer reinen Form" im Labor gewinnen, immer länger auf sich warten ließ und in immer weitere Ferne rückte. Die enorme Menge von aufgehäuften Fakten verlangte nach ordnenden Erklärungen. Dynamismus und Atomismus entwickelten sich als Theorien, die eine solche reine Darstellung vom Wesen der Elektrizität hypothetisch vorwegnahmen und von dieser "Wesensschau" aus die Fülle des Stoffes organisieren wollten.

Die beginnende theoretische Physik hingegen hält sich an das positivistisch-phänomenologische Programm, das als einer der ersten Fourier in seiner "Théorie analytique de la chaleur" formuliert hat. Ohm setzte mit seiner Theorie die Elektrizitätsströmung auf abstrakte Weise analog zur Wärmeströmung. Sich selbst sieht Ohm noch als Kontakttheoretiker, aber seine Theorie im eigentlichen Sinne trägt alle Zeichen seines phänomenologischen Vorbilds. Sie ist sowohl mit der kontakttheoretischen wie chemischen Hypothese verträglich, wie es bald darauf F.C. Daniell, Ch. Wheatstone und die Royal Society dartun. Die Folge dieser Entwicklung ist die, daß die "Wesensfragen" in der Elektrizitätslehre nicht mehr gestellt werden. Im Endeffekt bedeutete die Annahme der Ohmschen Theorie auch die Annahme von neuen Erklärungsgrundsätzen, die von denen des Atomismus und Dynamismus grundverschieden waren.

In den Kuhnschen Kategorien ausgedrückt ist dieser weltanschauliche Wandel revolutionärer Natur: das Verhältnis des Physikers zu seinem physikalischen Gegenstandsreich wird abstrakter, sachlicher, spezialisierter, theoretischer. Es ändern sich die Kriterien dafür, was nun als Anwendung der Elektrizitätslehre gilt (IV.2.5): ein bestimmtes Phänomen ist nicht mehr dann als Anwendung der Elektrizitätslehre ausgewiesen, wenn ihm bestimmte Züge zukommen, die es mit dem Wesen der Elektrizität gemeinsam hat, sondern wenn es in einer bestimmten mathematischen Formulierung sich ausdrücken und beschreiben läßt.

2. Normen der Theoriebildung (Von der anschaulichen Erklärung zur mathematischen Beschreibung). - Die neue Art der Theoretisierung in der Physik beeinflusste auch die Kriterien, die vom Physiker bei der Theoriebildung befolgt werden mußten. Für Dynamismus und Atomismus mußte eine Theorie "anschaulich" sein - "anschaulich" in einem eigenartigen idealistisch - naturphilosophischen Sinn. Dieser Anschaulichkeit mußte sich selbst die Mathematik unterordnen. Wie ein Zeitgenosse Ohms schreibt, sei Mathematik nur angebracht, "wo die anschaulichen Begriffe bei Betrachtung des Unendlichen in der Natur schwinden". Für manche Wissenschaftler schlossen sich Physik und Mathematik sogar völlig aus. Die Errungenschaften der Mechanik und der geometrischen Optik sah man als genuinen Teil der Mathematik an und institutionalisierte sie als "angewandte Mathematik!"

Ohm, und mit ihm die theoretische Physik, sind demgegenüber der Auffassung, daß, wie Ohm selbst schreibt: "jede auf Tatsachen gebaute Theorie einer Klasse von Naturerscheinungen, die in der Form ihrer Darstellung nicht die mathematische Ausführlichkeit erträgt, unvollkommen ist." In seinem Hauptwerk von 1827 "Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet" versucht er, diesem Anspruch gerecht zu werden, indem er eine axiomatisierte Theorie des Stromkreises vorlegt.

Auf der einen Seite ist der Wandel in der Auffassung von den Normen der Theoriebildung eine direkte Konsequenz des Wandels auf der weltanschaulichen Ebene und damit vom Wandlungstyp (IV.2.5). Andererseits manifestiert sich aber in diesem Wandel der Übergang zu einem höheren Reifezustand in den theoretischen Auffassungen, und damit ein Wandel vom Typ (I.1) und (I.2).

3. Einstellung zum Experiment (Von der "ars inveniendi" zur "ars demonstrandi"). - Zur Zeit von Ohm änderte sich auch die Auffassung von der Funktion des physikalischen Experiments. Für Dynamisten und Atomisten war Experimentieren eine kreative Tätigkeit, eine ars inveniendi. Man versuchte, durch die Entdeckung von immer neuen Effekten und immer neuen Querverbindungen zu anderen Wissensgebieten die Menge an Fakten zu vergrößern und hoffte, wenn man Atomist war, eines Tages die "elektrische Materie" unvermischt und unverbunden im Reagenzglas isolieren zu können. Durch dieses "experimentum crucis" wäre dann das Ziel der Elektrizitäts-

lehre erreicht und die letzte Einsicht in das Wesen der Elektrizität gewonnen.

Die theoretische Physik hingegen sieht im Experiment den Versuch, eine zuvor aufgestellte Theorie zu bestätigen. In seinen "Maßbestimmungen über die galvanische Kette" von 1831 gibt Gustav Theodor Fechner eine systematisch und methodisch bis ins letzte durchdachte Bestätigung des Ohmschen Gesetzes an (damals noch) inkonstanten Volta'schen Säulen mithilfe von Schwingungsuntersuchungen der Galvanometernadel. Er setzt damit bis dahin beispiellose Maßstäbe für jede weitere experimentelle Arbeit in der Elektrizitätslehre. Mit Ohm und Fechner wird das Experimentieren in der Elektrizitätslehre zu einer wesentlich nüchterneren Tätigkeit - einer ars demonstrandi.

Auch in dieser Änderung zeigt sich klar ein revolutionärer Wandel: das Experiment erhält einen völlig neuen Stellenwert und löst damit alte Experimentmethoden ab (Wandlungstyp IV.2.4).

4. Einstellung zur technischen Verwertbarkeit
(Von der Irrelevanz zum Erfolgsnachweis). - In den Äußerungen der Atomisten und Dynamisten findet sich häufig der Gemeinplatz, daß die technische Anwendbarkeit über ihren wissenschaftlichen Wert, dh. ihren Beitrag zur Klärung der Wesensfrage, nur wenig oder nichts aussage. So urteilt z.B. de la Rive unter Anspielung auf Ohm und Fechner, daß das

bloße und einfache Studium der elektrischen Leitfähigkeit, außer was die praktischen Resultate betreffe, nicht viel zum Fortschritt der Elektrizitätslehre beitragen könne. De la Rive sah wie Ampère und viele andere Zeitgenossen den Fortschritt nur in einer ganzheitlichen und vereinheitlichenden Erklärung von Elektrizität, Wärme, Licht und chemischen Prozessen in einer einzigen Theorie.

Nach Ohm traten eine ganze Reihe von Physikern auf, wie besonders Lenz und Wheatstone, die Ohms Theorie wegen ihrer Verwendbarkeit für den Bau von Telegraphenlinien und elektromagnetischen Maschinen annahmen und vertraten, obwohl sie sogar teilweise zugaben, sie verstünden die Bedeutung der Ohmschen Grundbegriffe nicht völlig. Immer häufiger findet sich nun ein neuer Gemeinplatz in der Literatur, der den erstgenannten in sein Gegenteil verkehrt: Die technische Verwertbarkeit ist ein Kriterium für den wissenschaftlichen Wert einer Theorie. Von 1860 - 90 wird die Elektrizitätslehre übrigens der erste Teil der Naturwissenschaft, der in nennenswertem Maße industriell anwendbar und verwertbar geworden ist, wenn man von der organisch-chemischen Farbenindustrie der 70er Jahre absieht.

Dadurch, daß sich die Einstellung zur technischen Verwertbarkeit der Elektrizitätslehre ändert, wird deutlich, daß sich die Kriterien geändert haben, mit deren Hilfe entschieden wird, ob gewisse physikalische Systeme,

in diesem Fall: technische Systeme, eine erfolgreiche Anwendung der Theorie darstellen oder nicht. Es zeigt sich hier also ein Element des revolutionären Wandels vom Typ (IV.2.5).

5. Modellbildung (Vom Reibungsmodell zum Wärmeleitungsmodell). - Wir kommen nun zu internen Elementen des Theoriwandels. F. U. Th. Aepinus bahnte im 18. Jahrhundert als erster den Weg für eine im weiten Sinne Newtonsche Konzeption der Elektrizitätslehre und des Magnetismus, unter Zuhilfenahme von anziehenden und abstoßenden Kräften. Die Effluvial- und Wirbeltheorien, die einem cartesischen Geist entsprungen waren, werden damit als widerlegt angesehen. Coulomb versuchte, diesen Weg konsequent weiterzugehen und gelangte schließlich zu seinem Gesetz, das für die Elektrostatik paradigmatisch wurde. Auch die Ansicht, die Coulomb vom Fließen der Elektrizität in Leitern hegte, war damals ebenfalls vorbildlich. Coulomb erklärt den Widerstand, den der Strom in einem unvollkommenen Leiter erfährt, im Modell der Reibung eines Körpers auf einer Oberfläche, also mit einem mechanischen Verschiebungswiderstand.

Das Reibungsmodell läßt sich auch auf geschlossene Stromkreise übertragen. Besonders einflußreich waren hier die Versuche von Humphry Davy. Die im Leiter wirksame Quantität an Elektrizität wird als abhängig angesehen von der Intensität der Säule, vermindert um den Widerstand, den der Strom im Schließungsdraht erfährt.

Wie schon erwähnt, löst Ohm dieses Modell ab durch das Fourier'sche "Wärmeleitungsmodell". Der eindimensionale Wärmeübergang q zwischen zwei Körperelementen ist dort proportional dem Temperaturunterschied ∂v :

$$q_x = -k w dt \frac{\partial v}{\partial x}$$

k = spez. innere Wärmeleitfähigkeit
 w = Querschnitt
 x = Abstand

woraus bei Ohm wird:

$$dQ = \frac{k w (u' - u) dt}{s}$$

K = spez. Leitfähigkeit
 u'/u = elektroskopische Kraft am Anfang und Ende eines stromdurchflossenen Leiters mit der Länge s und dem Querschnitt w

Der Strömungsvorgang bekommt hier also eine vom mechanischen Reibungsmodell grundverschiedene Deutung.

Nach längerer, komplizierter Ableitung erhält Ohm schließlich sein Gesetz:

$$S = \frac{A}{L}$$

wobei S = Stromgröße,
 A = Summe aller Spannungen,
 L = Summe aller reduzierten Längen im Stromkreis

Den "vor-theoretischen" Physikern war dieses Modell nicht anschaulich; unter dem Reibungsmodell konnten sie sich konkreter etwas vorstellen.¹⁾

- 1) Erst in den 40er Jahren des 19. Jahrhunderts, also ca. zwei Jahrzehnte nach Ohms Gesetz, fand Louis Poiseuille ein hydrodynamisches Gesetz, das besagt, daß durch eine Kapillarrohre pro Zeiteinheit die Flüssigkeitsmenge

$$Q = k \cdot \frac{H \cdot D^4}{L}$$

k = material- & temperaturabhängiger Koeffizient
 H = Druckhöhe
 D = Durchmesser
 L = Länge

fließt. Würde dies Gesetz schon vor Ohm aufgestellt worden, hätte es evtl. als "anschauliches" Modell eine bessere Analogie zu Ohms Gesetz darstellen können als das Wärmeleitungsmodell.

Im Wandel der Modellbildung haben wir wieder eine Änderung der Sichtweise vor uns, unter der die Anwendungen einer Theorie den Wissenschaftlern erscheinen (Wandlungstyp IV.2.2). Einmal erscheint das physikalische System aus der Elektrizitätslehre analog zu dem System 'gleitender Körper auf schiefer Ebene', das andere Mal analog zum System 'Wärmeströmung in einem homogenen Material'. Da sich in beiden Fällen die Modellvorstellung in einem mathematischen Gesetz manifestiert, liegt auch der Wandlungstyp (IV.2.1): Ablösung eines Grundgesetzes durch ein anderes, vor.

6. Ebene der wissenschaftlichen Klassifikation
(von der Elektrostatik/Elektrodynamik bzw. Chemie zur "Kinematik der konstanten Elektrizitätsbewegung")

Vor Ohm versuchte man auf das Phänomen der verschiedenartigen Leitung der Elektrizität durch verschiedene Stoffe, je nach Einstellung, entweder die Elektrostatik oder Elektrodynamik oder Chemie anzuwenden. Einige Forscher waren der Auffassung, daß die Entladung geladener Elektrizitätsträgerin irgendeiner Art und Weise etwas mit dem Coulombschen Gesetz zu tun haben müsse. Andererseits versuchte man, die Güte der Leitung durch stärkere Strömung, also eine elektrodynamische Kategorie, zu erklären. In beiden Fällen wird die Elektrizität in kleinste Teilchen zerlegt gedacht, die alle mit einer Fernkraftwirkung ausgestattet sind, die sich umgekehrt zum Abstand verhält - im Idealfall zum Abstandsquadrat. Die

der Elektrostatik bzw. -dynamik zugrundeliegende Erklärungsweise für den "elektrischen Mikrobereich" war also, zumindest bei den Atomisten, eine mechanische. Auf der anderen Seite versuchten die Chemiker, die Leitung der Elektrizität entweder als einen chemischen Prozeß zu beschreiben oder zumindest als durch solche Prozesse verursacht.

Ohm hat sich auf alle diese Erklärungsversuche nicht eingelassen. Als Kontakttheoretiker wollte er von chemischen Erklärungsversuchen nichts wissen. Ebenso wendet er sich auch explizit gegen die Verwendung der Coulombschen Fernkraftwirkung bei der (analytischen) Behandlung der Elektrizität im Stromkreis. Für die Phänomene des Zusammenhangs zwischen Stromstärke, Spannung und Widerstand im Stromkreis begründet er eine eigenständige Theorie, wobei ein Zusammenhang mit der Elektrostatik erst wieder in Kirchhoffs Deutung der elektroskopischen Kraft als Potentialdifferenz gesehen werden kann.

Auch die Beziehung zur Elektrodynamik ist nicht eindeutig: Die elektromotorische Kraft E der Säule ist eine statische Kategorie, die in Ohms Theorie mit der Stromstärke^I, also einer dynamischen Kategorie, sowie der Klemmenspannung, ^{U_k} deren Existenz von Ohms Zeitgenossen geleugnet wurde, in Zusammenhang gebracht wird. In moderner Formulierung: $U_k = E - R_i \cdot I$, wobei R_i den damals noch beträchtlichen Innenwiderstand der Stromquelle darstellt. Ohms Theorie impliziert also eine eigenartige

Abspaltung von etablierten Theorien, aber andererseits auch wieder eine Vermischung von, aus anderen Theorien hergeholten, disparaten Theorieelementen.¹ Ohms Theorie lag damit quer gegen jede damals etablierte Klassifizierung der elektrischen Phänomene. Anstatt normalwissenschaftlich vorzugehen und die anstehenden Probleme nach einer der bestehenden Theorien: Elektrostatik, -dynamik oder Chemie zu lösen, erklärt er die Probleme einfach zu einer Klasse eigener Art, die mit den gängigen normalwissenschaftlichen Anwendungen nichts zu tun haben.

Die Einführung von Ohms Theorie gleicht deshalb, auf der Ebene der Klassifikation betrachtet, dreierlei Arten des wissenschaftlichen Wandels auf einmal, in einer eigentümlichen Art und Weise. Sie hat alle Anzeichen eines revolutionären Wandels zweiter Art an sich: ein Gesetz, das bisher für die Anwendung auf einen gegebenen Bereich als zuverlässig galt, wird durch ein neues Gesetz verdrängt (IV.2.1). Im Gegensatz zu einer "klassischen" wissenschaftlichen Revolution wird jetzt jedoch das alte Gesetz nicht verworfen und vergessen, sondern nur der Gültigkeitsbereich bzw. Anwendungsbereich des alten Gesetzes (bzw. der Gesetze) wird neu abgesteckt. In diesem Sinne hat sich durch Ohms Gesetz eine Theorie von einer anderen abgespalten (Wandlungstyp II.2.2). Der Aufbau dieser neuen Theorie, die aus abgespaltenen Elementen besteht, kommt dann seinerseits wieder einer wissenschaftlichen Revolution erster Art gleich: Für

1) Kuhn, 1970, 243: "Ohms Gesetz war...revolutionär, und man leistete ihm dementsprechend Widerstand, weil es das Wiedervereinigen solcher Begriffe verlangte, die man früher getrennt auf Strom & Ladung anzuwenden gewohnt war."

einen bestimmten Bereich wird ein mathematisches Gesetz erstmalig eingeführt und auf eine Menge von physikalischen Systemen erstmals angewendet (IV.1.2 und IV.1.3).

7. Organisation des Theoriebereichs (von der Voltaschen Säule zum Stromkreis).

Durch Ohms Theorie wurde nicht nur das Klassifikationsschema der Elektrizitätslehre in Elektrostatik und -dynamik durchbrochen, auch die Menge der intendierten Anwendungen entsprach nicht der gängigen Einteilungsweise. Die Physiker vor und nach Ohm sehen ihre Experimentanordnungen in einem anderen Licht: Anwendungen, die vorher sehr heterogen im Vergleich untereinander erscheinen mußten, werden plötzlich als ähnliche und gleichartige Anwendungen eingestuft. Dieser Aspektwechsel fällt unter die Wittgensteinsche Kategorie des "Sehen als", des "gestalt-switch". Er soll in diesem Abschnitt kurz charakterisiert werden.

Die Atomisten und Dynamisten sehen in einer mit einem Draht geschlossenen Säule einen Apparat, der aufgrund seiner chemischen Beschaffenheit, seinen mannigfaltigen inneren Vorgängen ganz bestimmte elektrische Phänomene im Schließungsdraht erzeugt. Die Leitfähigkeit des Drahtes z.B. kann nach dieser Sicht sowohl von der Art der verwendeten Stromquelle (Volta'sche Säule, thermoelektrische Quelle, Reibungsapparat), der chemischen Beschaffenheit und der jeweiligen Intensität abhängen. Unter einem Leitungsgesetz verstand man folgerichtig ein

Gesetz, das die physikalische oder chemische Beschaffenheit eines Körpers in Zusammenhang bringt mit all den genannten Modifikationen der Leitfähigkeit. Außerdem werden die Phänomene an der offenen Säule und der geschlossenen Säule strikt getrennt, eine Einteilung, die sich auch sehr deutlich in den Lehrbüchern der Zeit findet.

Seit der Ohmschen Elektrizitätslehre, besonders in Wheatstones Fassung, ist die Natur der Stromquelle irrelevant geworden. Sie ist eine "black box", die nur wegen ihrer Stromabgabe interessant ist. Dieselbe Experimentanordnung, wie sie vor Ohm verwendet wurde, wird nun als "Stromkreis" gesehen - ein abstrakter Begriff, dem auch die Entladung von statisch aufgeladenen Körpern untergeordnet werden kann. Ebenso kann jede beliebige Stromquelle, ob sie nun offen oder geschlossen ist, unter den Begriff des Stromkreises subsumiert werden; für eine offene Stromquelle hat der Stromkreis einen unendlich großen Außenwiderstand. Die Messung der Spannung an der offenen und geschlossenen Säule kann auf dieselbe Formel zurückgeführt werden: für die geschlossene Säule ist $U_k = E - R_1 \cdot I$ und für die offene ist $E = U_k + R_1 I = (R_a + R_1) \cdot I$. Auch auf das Verhalten eines in den Stromkreis eingeschalteten Multiplikators wird die Theorie erfolgreich angewendet. Allen diesen Anwendungsmengen kommt nun eine Ähnlichkeit zu, die vor Ohm nicht gesehen werden konnte.

Damit ist auch der Weg frei für die Untersuchung allgemeiner struktureller Eigenschaften von Stromkreisen.

Die Formulierung der Kirchhoffschen Gesetze wird sogar zu einem äußerst wichtigen Markstein der Graphentheorie. Vielleicht kann man in dem Gestaltwechsel von "Voltascher Säule" zu "Stromkreis" Cassirers Idee von der allmählichen Ersetzung des Substanzbegriffes durch den Funktionsbegriff im modernen Denken wiederfinden. Jedenfalls vollzieht sich auf dieser Ebene der Organisation des Theoriebereichs ein Wandel, der dem Wandlungstyp (IV.2.2): Wandel der Sichtweise zuzurechnen ist.

8. Ebene der zugrundeliegenden Meßtheorie (neue Grundlegung der Messungen).

Auch in dem Bereich, der die meßtheoretische Grundlegung der Elektrizitätslehre betrifft, bewirkte Ohms Theorie einschneidende Veränderungen. Nachdem das Ohmsche Gesetz allgemeine Anerkennung gefunden hatte, wurde keine neue Meßmethode für die Bestimmung von Stromstärke, Spannung und Widerstand eines Stromkreises mehr eingeführt und kein neues Meßinstrument mehr konstruiert, für die Ohms Gesetz nicht in irgendeiner Weise Berücksichtigung gefunden hätte. Die Messung des (inneren und äußeren) Widerstandes einer "galvanischen Kette" ist in allen Methoden eine direkte Folgerung des Ohmschen Gesetzes; so bei Ohm selbst, Fechner, Pogendorff und Weber. Bei Labortafeln und sogar noch die Gültigkeit der Kirchhoffschen Gesetze im verzweigten Stromkreis vorausgesetzt werden.

Für die Messung der Stromstärke ist es wichtig, den Eigenwiderstand des Galvanometers zuberücksichtigen, falls das Galvanometer in den Stromkreis eingeschaltet ist. Diese Berücksichtigung kann nur durch Ohms Gesetz gerechtfertigt werden. Ansonsten ist die Theorie, nach der die Stromstärke gemessen wird, eine der Ohmschen Theorie zugrundeliegende Meßtheorie, die aus einem elektromagnetischen Gesetz hergeleitet werden muß. Die Messung der Spannung an der offenen und geschlossenen Säule ist ebenfalls (zumindest bis Kohlrausch 1849) nur durch Zugrundelegung des Ohmschen Gesetzes durchgeführt worden. Grundlegend sind auch hier Methoden von Ohm, Fechner, Wheatstone und Poggendorff. Für die Tatsache, daß erst verhältnismäßig spät die Spannungsverhältnisse am geschlossenen Stromkreis direkt mit einem Spannungsmesser gemessen wurden, gibt es mindestens zwei Gründe: es gab lange Zeit keine Stromquellen, die einen über längeren Zeit konstanten Strom abgegeben hätten, und außerdem war die Genauigkeit der Elektrometer für die Messung der Spannung nicht so groß, um eine unabhängige Bestätigung zu erreichen. Aber auch bei einer direkten Messung der Spannung mit dem Elektrometer muß wiederum der Eigenwiderstand des Meßinstruments berücksichtigt werden, was wiederum nur durch Rückgriff auf das Ohmsche Gesetz gerechtfertigt werden kann. Erst Wilhelm Weber gelang es 1851, und 1856 zusammen mit Kohlrausch, eine befriedigende Theorie für die absolute Messung der elektromotorischen

Kraft und der Stromintensität anzugeben. Gleichzeitig führten Weber und Kohlrausch 1856 diese Größen auf mechanische Einheiten zurück. Weber definierte 1851 die elektromotorische Kraft als die Kraft, die der Erdmagnetismus auf eine rotierende Leiterschleife, die geschlossen ist, ausübt.

Welcher Wandel hat sich also durch die Einführung des Ohmschen Gesetzes für die praktische Messung der elektrischen Größen ergeben? Ohms Theorie stellt eine Theorie für die Messung des Widerstandes dar - es wird also für eine grundlegende elektrische Größe erstmals eine Meßtheorie eingeführt (Wandlungstyp II.1.1). Bis zu Weber und Kohlrausch gilt darüber hinaus, daß für die Messung der elektromotorischen Kraft bzw. der Klemmenspannung im Stromkreis nicht die nach der Coulombschen Elektrostatik zu rechtfertigende Meßtheorie gilt, sondern das Ohmsche Gesetz selbst wieder als Meßtheorie hergenommen wird (Wandlungstyp II.1.2). Für andere elektrostatische Messungen bleibt die Coulombsche Meßtheorie unangetastet. Aus Kirchhoffs theoretischer Analyse folgt, daß die Coulombsche Ladungsmessung und die "Ohmsche" Messung der elektromotorischen Kraft als Messung der gleichen Größe identifiziert werden können. Im Grunde handelt es sich dabei jedoch um eine empirische Behauptung, die erst in der einheitlichen Messtheorie Webers und Kohlrahuschs analytisch wird. Diese einheitliche Meßtheorie, die die Spannung und Stromstärke als "Kraftwirkung"

(Weber) misst und so auf mechanisches Maß zurückführt, stellt dann schließlich einen Wandel nach Typ (II.1.3) dar: die Messung der elektrischen Größen, sowie der mechanischen Größen wurde in ein gemeinsames Maßsystem gebracht.

9. Definition der Grundbegriffe (Von "Menge", "Intensität" und "Leitfähigkeit" zu "Stromgröße", "elektroskopische Kraft" und "reduzierte Länge"). - Nun ist alles vorbereitet, um den Wandel der Grundbegriffe zur Zeit Ohms verstehen zu können. Vor Ohm wird in der Hauptsache mit drei Begriffen gearbeitet: Menge, Intensität und Leitfähigkeit. Die Intensität wird mit dem Elektrometer gemessen. Man ist überzeugt, daß sie nur an der offenen (ungeschlossenen) Säule vorhanden ist. Intensität wurde also als ein rein statisches Phänomen gesehen, das bei einer Entladung verschwindet. Beim Schließen einer Voltaschen Säule findet eine solche statische Entladung statt und die Intensität wirkt nur am Anfang, um den Widerstand im Schließungsdraht, wie bei einem "Durchschlageffekt", zu überwinden. Ähnlich gleitet ein Körper auf einer schiefen Ebene "von allein" weiter, wenn seine Haftreibung einmal überwunden ist. (Haftreibung ist etwas größer als Gleitreibung!) Die Quantität an Elektrizität, die durch den Schließungsdraht fließt, wird mit dem Galva-

nometer angezeigt und gemessen. Sie ist ihrerseits abhängig von der Leitfähigkeit der nicht-elektrizitätserregenden Teile des Stromkreises. Wichtig ist hier zu sehen, daß nach diesem Verständnis die Quantität/Zeit auch von der Anfangs-Intensität der Säule abhängt: eine Säule, die noch so viel Quantität besitzt, aber nicht genügend Intensität, um den Widerstand zu überwinden, wird keinen Stromfluß zustande bringen.

Neben diesen Begriffen mußten Ohms Umdefinitionen im günstigsten Falle sehr fremd erscheinen: Seine neuen Begriffe heißen: elektroskopische Kraft, Stromgröße und reduzierte Länge. Unter letzterer versteht man die Länge eines Standarddrahtes, bei der dieser Draht genau dieselbe Leitfähigkeit hat wie der ganze Stromkreis bzw. ein stromdurchflossenes Material. Unter der Leitungsgüte (spezifische Leitfähigkeit) eines Standarddrahtes versteht Ohm die Menge, die von einem Ort zum andern in der Zeiteinheit strömt, und nicht die Strömungsgeschwindigkeit, wie das oft vor ihm getan wurde.

Die Stromgröße S wird definiert als die Elektrizitätsmenge Q , die pro Zeiteinheit t durch den Querschnitt w eines Leiters fließt:

$$\frac{dQ}{dt} = S = kw \frac{du}{dx}$$

S wird dabei mit dem Multiplikator (=Galvanometer) gemessen. Q wird als die Summe der elektroskopischen Äußerungen definiert. Das würde bedeuten, daß auch die Menge mit dem Elektroskop meßbar geworden wäre, was Ato-

misten und Dynamisten undenkbar erschien.

Unter der elektroskopischen Kraft an einem Leiterpunkt versteht Ohm die Dichtigkeit der Elektrizität an diesem Punkt - eine Konzeption, die mit dem alten Intensitätsbegriff (also Spannungsbegriff) nichts mehr zu tun hat.

Unter der Spannung u , die an den Endpunkten eines stromdurchflossenen Leiters hervortritt, versteht Ohm schließlich die Differenz der elektroskopischen Kräfte an den Endpunkten des Leiters. Ohm fordert als Axiom in seiner Theorie, daß diese Differenz konstant ist: $u = u' = \text{konstant}$. Diese Annahme war für Ohm die wichtigste seiner ganzen Theorie. Sein Begriff der Spannung, die einem Stromkreis eingeprägt wird, war eng mit der kontakttheoretischen Hypothese verbunden.

Der Wandel der Bedeutung von Grundbegriffen einer Theorie war als ein Element des revolutionären Wandels (IV.2.3) bezeichnet worden.¹ Der Wandel der Grundbegriffe betrifft jedoch auch teilweise den Wandlungstyp (IV.2.1): Verdrängung eines Grundgesetzes durch ein anderes, denn die Bedeutung des Begriffs der reduzierten Länge, d.h. später: des Widerstandes, wird durch Ohms Gesetz erst implizit festgelegt!

1) vgl. Kuhn 1977, 419: "Weil die Anerkennung des Ohmschen Gesetzes eine Umdefinition elektrischer Begriffe erforderte, genau deshalb führte sie zu einer Revolution in der Theorie der Elektrizität."

4.4 Reflexion und Kritik des Begriffs der wissenschaftlichen Revolution

Die Darstellung der neun verschiedenen Kategorien, in denen sich der Wandel der Elektrizitätslehre zu Ohms Zeit beschreiben läßt, lieferte auch überzeugende Bestätigung für die Annahme, daß sich mit der Einführung und Rezeption der Ohmschen Theorie eine wissenschaftliche Revolution ereignet hat. Allerdings hat sich auch gezeigt, daß diese spezielle Ohmsche Revolution nicht vom selben Typ ist wie diejenigen Revolutionen, die als Paradefälle in Kuhns Theorie der wissenschaftlichen Revolutionen fungieren, wie z.B. die Kopernikanische Revolution oder Lavoisiers Umwälzung der Chemie oder Einsteins Einführung der Relativitätstheorie. Einerseits ist der Umfang der revolutionären Änderungen und ihrer mittelbaren Konsequenzen weniger groß als in den Paradefällen - er braucht nicht einmal die gesamte Elektrizitätslehre zu umfassen - andererseits ist die Ohmsche Revolution wesentlich komplizierter und weniger spektakulär abgelaufen als die Revolutionen in den Paradefällen. Im Versuch, wenigstens den geringeren Umfang solcher Revolutionen in seine Theorie von der Struktur wissenschaftlicher Revolutionen zu integrieren, hat Kuhn den Begriff der Mikro-Revolution geprägt. Dies ist eine wissenschaftliche Revolution, die nur für eine bestimmte kleine Gruppe der wissenschaftlichen Gemeinschaft relevant wird. Es wird nicht mehr von einer Revolution schlechthin gesprochen, sondern von 'Revolution für eine Gruppe von Wissenschaftlern'. Was

für die eine Gruppe der scientific community revolutionär ist, ist es für eine andere nicht, In diesem Sinne ist zu vermuten, daß die Ohmsche Revolution als eine Serie von mindestens drei Mikrorevolutionen zu beschreiben ist, nämlich eine Mikrorevolution für den größten Teil der deutschen Wissenschaftler, die sich mit der Elektrizitätslehre beschäftigen, später für eine englische Gruppe und noch später für die französischen Elektrizitätstheoretiker. Wie schon am Anfang dieser Arbeit herausgestellt wurde, gab es erst ab der Mitte des 19. Jahrhunderts eine wissenschaftliche Gemeinschaft, die international war. In dieser Arbeit lag der Schwerpunkt auf der Mikrorevolution für die deutsche Wissenschaftlergemeinschaft, obwohl natürlich eine ganze Reihe der angesprochenen Wandlungskategorien bei einer detaillierteren Beschreibung der anderen Mikrorevolutionen in ähnlicher Form wieder auftauchen würde.

Was die größere Komplexität und geringere Spektakularität der Ohmschen Revolution anbelangt, so liegt darin eine Herausforderung an die Wissenschaftstheorie, den Begriff der "wissenschaftlichen Revolution" mit einer größeren Flexibilität und Komplexität zu versehen. . Bisher hat sich die Wissenschaftstheorie überwiegend mit den Paradefällen von wissenschaftlichen Revolutionen beschäftigt, wobei sich das eigentlich revolutionäre Element meistens in einem einzigen Satz beschreiben und sich alle anderen Aspekte der revolutionären Wissenschaft

als Folgerungen aus diesem einen Satz darstellen lassen. So kann z.B. das Wesen der Kopernikanischen Revolution mit dem Übergang von Geozentrik auf Heliozentrik schlaglichtartig beschrieben werden, usw. Im Falle der Ohmschen Revolution würden alle ähnlichen Zusammenfassungen zu kurz greifen.

Darin ist wohl auch teilweise ein Motiv zu finden, das Sneed und Stegmüller veranlaßt hat, das Wesen einer wissenschaftlichen Revolution in der Verdrängung eines Theoriekerns durch einen anderen zu sehen. Die prägnanten kurzen Zusammenfassungen der wissenschaftlichen Wandlungen in den obengenannten Paradenfällen lassen sich nämlich ganz gut jeweils als Verdrängung eines Naturgesetzes durch ein anderes beschreiben.

Ich möchte die folgende Definition als Explikation der Grundgedanken von Sneed und Stegmüller vorschlagen. Zur darin benützten Bezeichnungsweise: Sei $D(I)$ die Menge der Individuenbereiche aller intendierten Anwendungen der Theorie T , d.h. derjenigen Individuenbereiche, die dadurch entstehen, daß bei den Elementen von I alle nicht-theoretischen Funktionen weggestrichen werden.

D 1 : Eine Theorie T ist durch eine Revolution von einer anderen Theorie T' getrennt, genau dann, wenn:

- (1) $T = \langle K, I, I_0 \rangle$ und $T' = \langle K', I', I_0' \rangle$ und T, T' sind physikalische Theorien im Sinne von Kuhn
- (2) T' ist eine zeitlich direkt nach T aufgestellte Theorie
- (3) Die mathematische Grundstruktur von K ist nicht identisch mit der mathematischen Grundstruktur von K'
- (4) $D(I) \cap D(I') \neq \emptyset$
- (5) $I \cap I' \neq \emptyset$

Die Bedingung (1) besagt, daß die Explikation des Kuhn-schen Theoriebegriffs, den Sneed und Stegmüller eingeführt haben, hier zugrundegelegt werden soll.¹ Nach dieser Auffassung besteht eine Theorie aus einem Strukturkern K und einer Menge von intendierten Anwendungen I. Der Strukturkern einer Theorie ist diejenige mathematische Struktur, mit deren Hilfe empirische Behauptungen aufgestellt werden.² Er stellt den Inhalt desjenigen mengen-theoretischen Prädikats dar, wodurch eine physikalische Theorie axiomatisiert wird. Eine empirische Behauptung wird dann vorgenommen, wenn man von einem physikalischen System (z.B. Sonnensystem; schwingendes Pendel) behauptet, die besagte Struktur (z.B. klassische Partikelmechanik mit dem 2. Newtonschen Gesetz) treffe auf das System zu. Unter den intendierten Anwendungen I einer Theorie ver-

1) Sneed 1971, 295 und Stegmüller 1973, 222. Zur ersten intuitiven Einführung in die Sneed'sche Metatheorie ist Stegmüller 1974 zu empfehlen. Siehe dort 175, 199 für den Revolutionsbegriff.

2) Sneed 1971, 171; Stegmüller 1973, 222

steht man physikalische Systeme (d.h. Individuenbereiche physikalischer Entitäten zusammen mit nicht-theoretischen Funktionen),¹ auf die die Theorie tatsächlich angewendet werden kann. Im Kuhnschen Theorienbegriff wird außerdem noch eine Teilmenge von I, nämlich I_0 ausgezeichnet. I_0 ist die Menge der paradigmatischen Anwendungen der Theorie, also die Menge derjenigen Problemlösungen, die die Paradigmen oder Lehrbeispiele ("exemplars" in der späteren Kuhnschen Ausdrucksweise) einer Theorie darstellen. Diese Anwendungen werden mit der Theorie selbst vorgelegt und werden als mustergültig für die wissenschaftliche Praxis betrachtet.

Zu (2): Wir sprechen nur dann von der Verdrängung einer Theorie durch eine andere, wenn die beiden Theorien zeitlich direkt aufeinander folgen. Wir würden nicht sagen, daß z.B. die babylonische Astronomie durch die Astronomie von Laplace verdrängt wurde, sondern schon spätestens durch die Ptolemäische Astronomie.

Zu (3): Stegmüller spricht davon, daß die Nichtidentität von Theoriekernen das zentrale Moment einer wissenschaftlichen Tradition ausmacht.² Die Identität zwischen zwei Theoriekernen ist so definiert, daß die beiden Kerne dieselbe mathematische Grundstruktur beinhalten, "daß zweitens die Unterscheidung zwischen theoretischen und nicht-theoretischen Funktionen dieselbe ist, und daß drittens eine vollkommene Übereinstimmung bezüglich der allgemeinen Nebenbedingungen besteht."³ Nichtidentität

1) Stegmüller 177, 186ff.

2) *ibid.* 244-253 und *lars.* 1974, 199.

3) Stegmüller 1973, 140. Wenn die Theoriekerne von 2 Theorien identisch sind, dann sind die Theorien im "gewachsenen" Sinne, nach Stegmüllers Bezeichnungsweise, identisch.

besteht demnach dann, wenn mindestens eine der drei Bedingungen nicht erfüllt ist. In (3) wird jedoch nur die erste Bedingung verlangt, nämlich die Nichtidentität der mathematischen Grundstrukturen von K und K' . Würde man allgemeiner die Nichtidentität der Kerne als Bedingung (3) fordern, so läge auch schon in solchen Fällen eine Revolution vor, wenn die Unterscheidung zwischen theoretischen und nicht-theoretischen Funktionen in K' anders als in K verlaufen würde oder die Nebenbedingungen von K' andere als in K wären, sonst jedoch die mathematische Grundstruktur von K' identisch bleibt mit der von K . Falls solche Fälle in der Geschichte der Naturwissenschaft auftreten, würde man noch nicht von einer Revolution sprechen. Erst bei Änderung der mathematischen Grundstruktur selbst tritt eine Revolution auf.

In dieser Bedingung (3) wird die zentrale Sneed/Stegmüllersche Intention festgehalten: Nur wenn sich die mathematische Struktur des Strukturkerns einer Theorie ändert, dann liegt eine Revolution vor. Über das Verhältnis von I_0 zu I_0' bzw. von I zu I' wird dabei nichts ausgesagt.¹⁾

Zu (4): Von der revolutionären Verdrängung einer Theorie kann man trivialerweise nur dann sprechen, wenn die beiden Theorien über "dasselbe" sprechen, d.h. über eine gemeinsame Menge von Individuenbereichen. In der bisherigen Diskussion des strukturalistischen Theorien-

1) Stegmüller 1975a, 28: "I reserve the phrase 'theory dislodgement' to refer to the displacement of the basic core K_0 , either alone or together with the set I_0 ."

konzepts von Sneed und Stegmüller ist meines Wissens bisher noch kein befriedigendes Kriterium vorgelegt worden, mit dessen Hilfe man die Frage entscheiden könnte, wann Theorien "über dasselbe" sprechen. Insbesondere ist es nicht klar, ob man sagen soll, daß Theorien über dasselbe sprechen, wenn sie über dieselben Individuenbereiche sprechen oder wenn sie über dieselben physikalischen Systeme sprechen. Durch die Bedingung (4) ist mindestens eine Überlappung der Individuenbereiche gewährleistet. Das heißt also, daß mindestens die Bedeutung (im Fregeschen Sinne) derjenigen Ausdrücke, mit deren Hilfe Elemente des Individuenbereiches vorphysikalisch (also weder mit theoretischen, noch mit nicht-theoretischen Funktionen) beschrieben werden, sich gleichbleibt: auch in einer wissenschaftlichen Revolution. Würde man eine solche Überlappung von revolutionär getrennten Theorien nicht voraussetzen, so könnte man z.B. die absurde Behauptung aufstellen, daß die Theorie Darwins (1859) durch die bald darauffolgende Theorie Maxwells (1865) verdrängt worden wäre.

Zu (5): Sneed und Stegmüller fordern jedoch über (4) hinausgehend, daß sich nicht nur die Individuenbereiche überschneiden müssen, damit wir von einer Theorie desselben Erfahrungsbereiches sprechen, sondern zusätzlich beide Theorien noch einen Bereich physikalischer Systeme (also Individuenbereiche plus nicht-theoretische Funktionen) gemeinsam haben müssen. In (5) ist gefordert,

daß diese physikalischen Systeme intendierte Anwendungen der jeweiligen Theorie sein sollen.¹ Man könnte einwenden, daß es besser sei, anstatt von den intendierten Anwendungen I einer Theorie von den möglichen intendierten Anwendungen ($A(K)$ bzw. $A_e(E)$ in Stegmüllers Bezeichnungsweise) einer Theorie eine Überlappung zu fordern. Legt man jedoch I zugrunde, so wird der Tatsache Rechnung getragen, daß die revolutionär wirkenden Wissenschaftler tatsächlich die Intention haben, ihre neue Theorie auf schon tatsächlich vorliegende Anwendungen aus der alten Theorie praktisch anzuwenden. Wäre das nicht der Fall, dann könnten sie nicht überzeugt sein, daß ihre eigene Theorie besser ist als die ihrer Vorgänger.

Stegmüller hat nun den Begriff der Theorienverdrängung zusätzlich spezifiziert durch die Einführung der Unterscheidung zwischen Theorienverdrängung mit Fortschritt und einer solchen ohne Fortschritt.² Von einem Fortschritt soll nur gesprochen werden, wenn die frühere Theorie auf die spätere reduziert werden kann. Im Anschluß an D 1 möchte ich das in folgender Form explizieren:

D 2 : Die Verdrängung von T durch T' ist fortschrittlich gdw.

(1) - (5) wie in D 1, S. 201

(6) T ist auf T' reduzierbar

1) Wenn D 1 (5) vorliegt, folgt, daß auch (4) vorliegt. Für die weitere Diskussion ist es einfacher und übersichtlicher, (4) trotz (5) eigens aufzuführen.
2) Stegmüller 1973, 248f., 255; ders. 1976, 201

D 3 : Die Verdrängung von T durch T' ist nicht fortschrittlich gdw.

(1) - (5) wie in D 1

(6) T ist nicht auf T' reduzierbar

Unter der Reduktion einer Theorie T auf eine andere T' versteht man einen ganz bestimmten Vergleich einer Theorie durch eine andere. Dieser Vergleich kann nun rein formal ausfallen, indem man eine ein-mehrdeutige Relation definiert, die jedem partiell potentiellen Modell $x \in M_{pp}$ der einen Theorie T mindestens ein $x' \in M'_{pp}$ von T' zuordnet.¹ Inhaltlich gesprochen muß jedoch noch mehr hinzukommen. Es muß nicht nur diese spezielle mathematische Eigenschaft, die sich in der Relation ausdrückt, angegeben werden, sondern es muß außerdem sichergestellt sein, daß das $x \in M_{pp}$ von T, das einem oder mehreren Elementen aus M'_{pp} von T' entsprechen soll, dasselbe besagt, wie eben diese entsprechenden Elemente aus M'_{pp} :

Von der Reduktionsrelation erwartet man, daß sie jede intendierte Anwendung von T auf (mindestens) eine intendierte Anwendung von T' auf solche Weise abbildet, daß jede Erklärung oder sonstige Systematisierungsleistung, die von T erbracht worden ist, von T' übernommen werden kann. Wenn dabei ein $x \in M_{pp}$ einem $x' \in M'_{pp}$ entspricht, so soll vom inhaltlichen^{pp} Standpunkt aus gesagt werden, daß x und x' 'dasselbe' Objekt ist, allerdings in jeweils verschiedener Weise beschrieben.²

Das Vorliegen einer formalen Reduktion zwischen zwei Theorien ist also erst eine notwendige Bedingung für das Vorliegen einer philosophisch interessanten inhaltlichen Reduktion, und noch keine hinreichende Bedingung. Mög-

1) Definitionen für formale Reduktionsrelationen sind in Stegmüller 1973, 146ff. gegeben.

2) *ibid.*, 145

licherweise müssen für einen Begriff der Reduktion, der philosophisch voll befriedigend ist, noch mehr inhaltliche Bedingungen als die eine eben genannte zur formalen Bedingung hinzukommen. Im folgenden soll von "Reduktion" nur im inhaltlichen, weiteren Sinne gesprochen werden und nicht nur im formalen Sinne.

Wir stellen uns nun die Frage, ob bzw. inwieweit die vorgelegte allgemeine Definition der 'revolutionären Verdrängung einer Theorie durch eine andere' - unter der Voraussetzung, daß sie eine adäquate Explikation des Kuhn'schen Revolutionsbegriffs darstellt - auf die Ohmsche Revolution angewandt werden kann.

Zunächst ist es klar, daß die Bedingung (2) von D 1 erfüllt ist nach Voraussetzung. Es seien auch die Kerne und intendierten Anwendungen, sowie die paradigmatischen Beispiele der Ohmschen und Vorohmschen Theorien angegeben, also (1) erfüllt. Außerdem sind wir, zumindest intuitiv, überzeugt, daß sowohl Ohm als auch seine Vorgänger das Gleiche betrieben haben, nämlich Elektrizitätslehre, und über keine unterschiedlichen Gebiete gesprochen haben. Es ist also zumindest die Intention von (4) erfüllt.

Wie steht es mit der "zentralen Revolutionsbedingung" (3) von D 1? Sie erweist sich im speziellen Fall der Ohmschen Revolution als zu weit. Um diese These näher zu erläutern, muß zunächst der Begriff des Verfügens ^{über} eine Theorie eingeführt werden.

Sneed und Stegmüller haben diesen Begriff so formuliert, daß die Verfügung auch über die Erweiterungen des Strukturkerns mitdefiniert wird.¹ Die hier vorgeschlagene Definition, die die folgende Diskussion vereinfachen soll, gilt für den Fall, daß noch garkeine Erweiterungen konkret vorliegen und auch keine weiteren Anwendungen neben den paradigmatischen angegeben worden sind. Man könnte also im Vergleich zu Stegmüllers Definition von der "Anfangsverfügung" über eine Theorie sprechen.

D 4 : Eine Person p verfügt im Sinne von Kuhn über eine Theorie T gdw.

- (1) $T = \langle K, I, I_0 \rangle$ und T ist eine physikalische Theorie im Sinne von Kuhn
- (2) p glaubt, daß es eine nichtleere Menge $I - I_0$ gibt, so daß gilt: K ist auf diese Menge anwendbar oder es gibt eine Erweiterung von K, so daß diese Erweiterung darauf anwendbar ist.
- (3) p anerkennt, daß K erfolgreich auf I_0 angewendet wurde.

1) Stegmüller 1975, 223; Sneed 1971, 294

Um nun plausibel zu machen, daß D 1 für die Ohmsche Revolution zu weit ist, muß gezeigt werden, daß es zur Zeit Ohms Wissenschaftler gab, die zwar Ohms Gesetz anerkannten, jedoch keine revolutionäre Ohmsche Wissenschaft betrieben haben, sondern Ohms Gesetz nach der vorrevolutionären Praxis gebrauchten. In der Tat gab es, wie oben S.130 dargelegt wurde, in den vierziger Jahren des letzten Jahrhunderts einige Physiker, die durchaus Ohms Gesetz anzunehmen und in ihre vorohmsche Theorie zu inkorporieren bereit waren, ohne über Ohms Theorie im Sinne von D 4 zu verfügen. Es sind dies diejenigen Forscher, von denen Kohlrausch 1849 schreibt, daß sie zwar Ohms Gesetz angenommen hätten, "weil es sich als Tatsache herausstellte", jedoch den "Zusammenhang zwischen den elektroskopischen Eigenschaften der geschlossenen Kette und dem Strome", der sich aus Ohms Gesetz ergibt, "gar nicht anzunehmen bereit sind".¹ Diese Wissenschaftler sind also offenbar der Überzeugung, daß wenn sie die Anwendungen des Ohmschen Gesetzes auf die geschlossene Kette nicht anerkennen, sie das Ohmsche Gesetz als Erweiterung ihrer vorohmschen Theorie akzeptieren können. In diesem Falle nämlich kann man das Ohmsche Gesetz als Erweiterung der bisher geglaubten Gesetze der offenen Säule annehmen und braucht die revolutionären Veränderungen, die besonders die Sichtweise, Methoden und Begriffe der Ohmschen Theorie angehen, nicht mitzumachen.

1) Pogg. Ann. 78, 1849, 1

Diese Einstellung galt vorzugsweise für Kontakttheoretiker. Diese waren nämlich der Auffassung, daß genau die Annahme des Ohmschen Gesetzes als eine Erweiterung ihrer kontakttheoretischen Hypothese für eben diese Kontakttheorie neue und entscheidende Belege beizubringen in der Lage war. Besonders ist hier wieder C.H. Pfaff anzuführen, dessen Verteidigung des Ohmschen Gesetzes als Erweiterung der Kontakttheorie schon oben (S. 130ff vgl. auch S. 141ff) angeführt worden war.

Für eine zweite Gruppe von Forschern liegt es ebenfalls nahe, ihre Verwendungsweise des Ohmschen Gesetzes als vorrevolutionäres Verfügen zu interpretieren. Für sie ist die technische Seite der Elektrizitätslehre interessant. Die Elektrizitätslehre erscheint als ein Fundus an Verfahrensregeln für den Elektroingenieur. Die theoretischen Zusammenhänge sind dabei völlig gleichgültig. Das Ohmsche Gesetz erscheint als eine neue Regel, mit deren Hilfe man bei gegebener elektromotorischer Kraft der Stromquelle und bekanntem Innenwiderstand die Intensität der Elektrizität im Leitungsdraht für beliebige Leiterlängen, etwa einer Telegraphenleitung, berechnen kann. Hier wird Ohms Gesetz klar auf den dynamischen Fall des geschlossenen Stromkreises angewendet, jedoch taucht die elektromotorische Kraft nicht als "Spannung" oder "Potentialdifferenz" auf, sondern als eine Konstante, die von der Beschaffenheit der Säule abhängt und sich auch "zufällig" aus unbekannten und nicht interessierenden

Gründen in der Messung an der offenen Säule niederschlägt. Nach der theoretischen Begründung der Größe wird nicht weiter gefragt.

Es steht zu vermuten, daß auch in England nach 1841 einige Forscher das Ohmsche Gesetz als mögliche Erweiterung der chemischen Hypothese angenommen haben, ohne ihre vorohmsche Sprechweise von "intensity" und "quantity of electricity" zu ändern. (Siehe oben S. 150ff.)

Was ergibt sich für die Explikation des Revolutionsbegriffs aus diesen Beobachtungen? Wir müssen daraus folgern, daß die Annahme des Ohmschen Gesetzes nicht ausreichend für eine Revolution war, sondern daß erst eine spezielle Art der Verwendung des Ohmschen Gesetzes den Ausschlag gab. Die genannten Kontakttheoretiker, wie besonders Pfaff, konnten Ohms Gesetz deswegen akzeptieren, weil sie nicht die ganze paradigmatische Anwendungsmenge der Theorie Ohms annahmen, sondern lediglich einen Teil davon. Die Anwendungen, die Ohm selbst mit seinem Gesetz intendierte, waren also verschieden von der Menge der Anwendungen, die Pfaff u.a. damit intendierten. Und in dieser Differenz des verschiedenen Verfügens über eine und dieselbe Theorie liegt das eigentlich revolutionäre Moment der Theorienverdrängung. Wenn der allgemeine Revolutionsbegriff D 1 also adäquat sein soll, auch für eine solch komplexe wissenschaftliche Revolution wie die Ohmsche, dann muß dieser Grundgedanke der verschiedenartigen Verwendung eines Grundgesetzes im Begriff des

revolutionären Wandels mit berücksichtigt werden. Mit dieser Berücksichtigung wird sich auch für den Wandel der Begriffe, Sichtweisen und Methoden,¹ die Kuhn neben dem Kernwechsel in einer Revolution sieht, eine zwanglose Erklärung finden lassen.

Um dies zu erreichen und in eine neue Explikation einzubringen, sollen zuerst einige wichtige Hinweise diskutiert werden, die sich bei Wittgenstein, Putnam und Stegmüller finden.

Kuhn sieht, wie schon bemerkt, in einer Revolution wesentlich auch einen Wandel in der Bedeutung der Grundbegriffe. Dieser Wandel der Grundbegriffe wird durch das in D 1 vorgelegte Modell einer wissenschaftlichen Revolution entweder überhaupt nicht wiedergegeben, oder es soll sich aus der Verschiedenheit des Theoriekerns ergeben. Wenn wir den zweiten Fall annehmen, dann sind zumindest solche Fälle, in denen zwar verschiedene Theoriekerne, deren Begriffe gleichlautend sind, aber verschiedene Bedeutung haben, in der Sneed-Stegmüller-Explikation unterdeterminiert. Die Theoriekerne allein genügen nicht, um die Bedeutung der in ihnen vorkommenden Begriffe festzulegen. Dieser Weg war für die Aussagenkonzeption von Theorien gangbar, die in einer starken Version die Bedeutung von den Grundbegriffen, die in den Axiomen der Theorie vorkommen, als impliziert definiert ansehen kann durch die Menge aller möglichen Ableitungen aus diesen Axiomen. Dieser Weg ist aber für die strukturelle

1) Kuhn 1962, Kapitel XI passim

Theorienkonzeption nicht gangbar. Hier muß noch ein zusätzliches Element gefunden werden, wodurch man die Bedeutung der Grundbegriffe der Theorie determiniert sieht.¹ Hier bietet sich Wittgensteins Bedeutungstheorie an: Man kann nach Wittgenstein "für eine große Klasse von Fällen der Benützung des Wortes 'Bedeutung' - wenn auch nicht für alle Fälle seiner Benützung - dieses Wort so erklären: Die Bedeutung eines Wortes ist sein Gebrauch in der Sprache".² Die Bedeutung eines Wortes wird hier identifiziert mit der Funktion, die es in einem Sprachspiel, d.h. in einer öffentlich sanktionierten bzw. sanktionierbaren Verwendungsweise, innehat. Die Funktion besteht in einer gewissen Art und Weise des Gebrauchs zu einem ganz bestimmten Zweck.

Wie kann nun die Wittgensteinsche Bedeutungstheorie auf die Theorie der Bedeutung naturwissenschaftlicher Begriffe übertragen werden? Eine Möglichkeit kann so lauten:

D 5 : Die Bedeutung der in einem Grundgesetz (Theorie- kern)vorkommenden Begriffe besteht in dem Gebrauch des Grundgesetzes in der wissenschaftlichen Praxis. Mit dieser Formulierung ist sowohl der Wittgensteinschen Bedeutungstheorie Rechnung getragen, als auch der Tatsache, daß ein Gesetz auch ein formales Gerüst für die Verwendung von Begriffen liefert, dem die praktische Verwendung des naturwissenschaftlichen Begriffs immer genügen muß, um

1) Auf diesen Sachverhalt hat auch Kuhn in jüngster Zeit hingewiesen. Kuhn 1976, 190ff.

2) Wittgenstein 1953, §43. Vgl. etwa Kutschera, 1971, 225ff. oder Heidelberger 1972 für die Diskussion der Bedeutungstheorie Wittgensteins.

korrekt zu sein. Aus dieser Übernahme der Wittgenstein-schen Bedeutungstheorie D 5 ergibt sich, daß umgekehrt eine verschiedenartige Verwendung eines Grundgesetzes eine verschiedenartige Bedeutung der im Gesetz vorkommenden Begriffe impliziert. Wenn wir nun "Verwendung eines Gesetzes" identifizieren mit "intendierter Anwendung einer Theorie", so können wir sagen, daß die Annahme eines neuen Gesetzes für einen festen Individuenbereich dann revolutionär ist, wenn die im Gesetz vorkommenden Begriffe - via unterschiedlicher Mengen von Anwendungen des Gesetzes - eine andere Bedeutung haben als die im alten Gesetz vorkommenden Begriffe.

In eine ähnliche Richtung zielte Putnam bei seiner Kritik der Popperschen Wissenschaftstheorie. Diese Kritik kann in modifizierter Form auf die Sneed/Stegmüllersche Explikation des Theorienbegriffs übertragen werden. Daraus ergibt sich dann ein neues Argument für die Annahme, das Wesen der revolutionären Theorienverdrängung nicht in Einführung eines neuen, mit dem vorhergehenden nicht identischen Grundgesetzes zu sehen, sondern in der Menge der intendierten Anwendungen, die mit diesem Gesetz einhergehen. Dazu muß Putnams Kritik etwas ausführlicher zitiert werden:

Popper's mistake here is no small isolated failing. What Popper consistently fails to see is that practice is primary: ideas are not just an end in themselves (although they are partly an end in themselves), nor is the selection of ideas to 'criticize' just an end in itself. The primary importance of ideas is that they guide practice in science, in technology, and

sometimes in public and private life. ... Popper denies that the accumulation of perceptual experience leads to theories: he is right that it does not lead to theories in a mechanical or algorithmic sense; but it does lead to theories in the sense that it is a regularity of methodological significance that (1) lack of experience with phenomena and with previous knowledge about phenomena decreases the probability of correct ideas in a marked fashion; and (2) extensive experience increases the probability of correct, or partially correct, ideas in a marked fashion.¹

In Übertragung dieser Kritik auf den in D 1 präzisierten Revolutionsbegriff von Sneed/Stegmüller könnte man sagen:

Für den Begriff der wissenschaftlichen Revolution bei Sneed und Stegmüller ist der Wandel von wissenschaftlichen Ideen zentral. Es zeigt sich jedoch, in historischen Untersuchungen und aus systematischen Gründen, daß die Verwendungsweise der wissenschaftlichen Idee, also die Menge der intendierten Anwendungen einer Theorie, primär ist. Sneed und Stegmüller berücksichtigen in nicht ausreichendem Maße, daß es eine neue Art der Verwendung einer Theorie ist, die zu einer neuen normalwissenschaftlichen Tradition führt und nicht die bloße Einführung einer neuen, wenn auch radikal neuen, Idee.

Schon aus folgenden Gründen erscheint es plausibel, daß es die neue und andere Art der Verwendung einer Theorie ist, die die eigentliche wissenschaftliche Revolution ausmacht:

- (1) Je größer und je überzeugender die Menge der paradigmatischen Anwendungen einer Theorie ist, desto wahrscheinlicher wird es, daß die neue Theorie die alte Theorie verdrängt.²
- (2) Wenn ein Wissenschaftler einige oder alle paradigmatischen Anwendungen einer Theorie nicht anerkennt, dann ist es unmöglich, daß er eine wissenschaftliche Revolution mitmacht, selbst wenn er die mathematische Struktur der neuen Theorie als solche anerkennt. (Nichtanerkennung paradigmatischer Anwendungen heißt insbesondere: Unfähigkeit, ein neues Gesetz auf konkrete Fälle anzuwenden, sowie mangelnde Bereitschaft, solche Anwendungen selbst durchzuführen.)
- (3) Je länger und je erfolgreicher ein Wissenschaftler mit einer Theorie auf einem ganz bestimmten Gebiet gearbeitet hat,

1) Putnam 1974, 268

2) Kuhn 1973, 443: "Wie unverstündlich die neue Theorie auch den Vertretern der Tradition sein mag, die Darlegung eindrucksvoller Ergebnisse wird wenigstens einige von ihnen davon überzeugen, daß sie sich darum kümmern müssen, wie diese Ergebnisse erzielt wurden."

d.h. also, je größer und je besser seine Erfahrung mit den Anwendungen der Theorie ist, desto unwahrscheinlicher wird es, daß er eine neue Theorie als Anfang einer neuen normalwissenschaftlichen Tradition für sein Gebiet anerkennt. ¹ Dies kann selbst dann der Fall sein, wenn er den Formalismus der neuen Theorie anerkennt.

Diese Regelmäßigkeiten, durch geschichtliche Beispiele belegbar, sind (ganz im Sinne von Putnam) von methodologischer Bedeutung. Nicht die Anerkennung einer neuen mathematischen Grundstruktur ist revolutionär (obwohl sie notwendig für eine Revolution ist), sondern die Anerkennung der speziellen Verwendungsweise dieser Struktur.

Mit der Forderung nach dem "Primat der Praxis" (Putnam) hat Putnam eine allgemeine Adäquatheitsbedingung für Metatheorien formuliert. Gleichzeitig hat er gezeigt, daß Poppers Wissenschaftstheorie ihrem Wesen nach dieser Adäquatheitsbedingung nicht genügen kann. Wie steht es in dieser Hinsicht mit Stegmüllers Position? Im Unterschied dazu läßt sich jedoch die in D 1 präzisierte Auffassung von Stegmüller durch einige Zusätze mit Putnams Adäquatheitsforderung vereinbaren. Intuitiv gesprochen läßt sich das so durchführen, daß man (1) den "Wandel der Ideen" (wie er in D 1 expliziert wurde) als notwendige Bedingung für das Vorliegen einer Revolution nimmt, die erst zusammen mit einer neuen Bedingung (2), dem "Wandel der Verwendungsweise", auch hinreichend für revolutionäre Theorienverdrängung wird.

1) vgl. dazu besonders Kuhn 1973, speziell 426

Wie kann dies am besten geschehen? In einem völlig anderen Zusammenhang hat Stegmüller auf einen Prozeß hingewiesen, in dessen Verlauf sich die Verwendungsweise einer Theorie ändern kann. Es handelt sich um die Verzweigung der intendierten Anwendungsmenge ein und desselben Theoriekerns während der normalwissenschaftlichen Phase.¹ Damit ist folgendes gemeint: Es ist nicht ausgeschlossen, daß ein Theoriekern (oder seine Spezialisierung), der auf eine Menge I_0 anwendbar ist, zwar auf eine Menge von Anwendungen $I_1 = I_0 \cup \{x_1\}$ oder $I_1^+ = I_0 \cup \{x_2\}$ anwendbar ist, aber nicht auf $I_0 \cup \{x_1\} \cup \{x_2\}$. "In such a situation", schreibt Stegmüller, "neither the theory, nor experience, nor logical reasoning can help. The scientist must decide on the basis of value judgments".² Stegmüller nennt eine solche Situation "progress branching in normal science". Im folgenden wird dahingehend argumentiert, daß bei einer Übertragung dieser Idee der Verzweigung auf die revolutionäre Wissenschaft einerseits die Ohrsche Revolution adäquater expliziert werden kann, und andererseits dadurch einige Eigenschaften, die Kuhn dem revolutionären Wandel zuschrieb (wie Inkommensurabilität und partielles Zusammenbrechen der Kommunikation unter den Wissenschaftlern) adäquater rekonstruiert werden können.

Wir haben schon bei der Definition D 1 gesehen, daß zwei Theorien, die voneinander durch eine Revolution getrennt sind, einen Teil ihres Individuenbereiches gemeinsam haben müssen, damit wir überhaupt sagen können, daß

1) Stegmüller 1976, 157

2) *ibid.*

beide Theorien "über dasselbe" sprechen, von "demselben" Erfahrungsbereich handeln. Angenommen, es wäre nicht nur ein gemeinsamer Individuenbereich gegeben, sondern ein gemeinsamer Bereich intendierter Anwendungen, der I^+ genannt werden soll. Es gelte: $I^+ = I \cap I' \neq \emptyset$.

Die Teilmenge der Menge I der intendierten Anwendungen, die nach Abzug von I^+ den Rest von I ausmacht, nennen wir $\bar{I}$ und analog für I' : $\bar{I}'$; also: $\bar{I} = I - I^+$ und $\bar{I}' = I' - I^+$. In einer Revolution, für die I^+ nicht leer ist, tritt nun der Fall ein, daß zwar gilt, daß die Theorie T' mit dem neuen Kern K' anwendbar ist entweder auf $\bar{I} \cup I^+$ oder auf $\bar{I}' \cup I^+$, aber nicht auf $I^+ \cup \bar{I} \bar{I}'$! Wäre K' auch auf $I^+ \cup \bar{I} \bar{I}'$ anwendbar, könnte K' in irgendeiner Weise mit K versöhnt werden, etwa als Kernspezialisierung, oder als neue, zugrundeliegende Meßtheorie, oder als neue Nebenbedingung, oder einfach als eine weitere Theorie, die man neben die bestehende Theorie stellt, ohne sie mit ihr direkt zu verbinden. K' könnte also in irgendeiner Weise so modifiziert werden, daß es entweder als fortschrittliche Erweiterung des normalwissenschaftlichen Bemühens erscheint oder daß es als immun für den mit K geführten normalwissenschaftlichen Prozeß angesehen wird.

Warum kann durch Übernahme der Anwendungsverzweigung auf den revolutionären Fall die Ohmsche Revolution besser expliziert werden? Wir haben gesehen, daß z.B. Pfaff das Ohmsche Gesetz anwendet auf das Problem der Ursache der

Elektrizitätserzeugung in der Voltaschen Säule. Er möchte also durch Anwendung des Ohmschen Gesetzes auf den Kontakt zweier verschiedener Metallstücke in der offenen Voltaschen Säule einen Beweis dafür erbringen, daß die kontakttheoretische Hypothese mehr erklären kann als die chemische Hypothese. Für das Ohmsche Gesetz in seiner revolutionären Verwendung stellt der Kontakt zweier Metalle in einer Voltaschen Säule überhaupt keine Anwendung dar. Zwar war Ohm selbst überzeugt, daß sein Gesetz relevant ist für die Kontakttheorie, aber später wurde nachgewiesen, daß in der revolutionären Fassung das Gesetz weder relevant ist für die Kontakttheorie noch für die chemische Theorie. Die Menge $\bar{I}$ der vorohmschen Theorie $T = \langle K, I, I_c \rangle$ besteht also aus zwei Metallstücken in einer Säule und ihrem mit dem Elektrometer gemessenen Wert.

Umgekehrt hat Ohm sein Gesetz auf Fälle angewendet, die für Pfaff nicht annehmbar waren, z.B. auf die geschlossene Säule und eine Menge von anderen Anwendungen. $\bar{I}'$ besteht also mindestens aus einem geschlossenen Stromkreis nebst der Messung des durch ihn fließenden Stromes mit dem Multiplikator. Auf die elektroskopischen Eigenschaften der offenen Säule können beide das Gesetz anwenden, sowohl Pfaff, der es vorrevolutionär verwendet, als auch Ohm, der über eine revolutionäre Verwendungsweise verfügt. (Bei der Anwendung des Ohmschen Gesetzes auf

den statischen Fall verwendet Pfaff, wie wir sahen, den Begriff der elektromotorischen Kraft im Sinne der Menge der in der Säule enthaltenen Elektrizität; s.o. S. 130f.)¹

Wenn wir nun die Wittgensteinsche Bedeutungstheorie anwenden, dann können wir auch über die Bedeutung der Begriffe, mit deren Hilfe I^+ formuliert wird, etwas aussagen. Wenn $\bar{I}$ bzw. $\bar{I}'$ nicht leer sind, dann ist es klar, daß die Begriffe, mit denen die in I^+ liegenden Anwendungen charakterisiert werden, verschiedene Bedeutung haben, je nachdem ob man über K' in vorrevolutionärer oder nachrevolutionärer Art und Weise verfügt, d.h. je nachdem welchen Zweig der intendierten Anwendungsmenge - ob $\bar{I}$ oder $\bar{I}'$ - man einzuschlagen sich entschieden hat. Wenn die Bedeutung von Begriffen ihr Gebrauch ist, so ist der sich in $\bar{I}$ und $\bar{I}'$ manifestierende verschiedene Gebrauch ein Beweis dafür, daß die Bedeutung der Begriffe in $I^+ \cup \bar{I}$ sich unterscheidet von der Bedeutung der Begriffe in $I^+ \cup \bar{I}'$. Über I^+ , aber nur über I^+ können sich beide Parteien bis zu einem gewissen Grade rational verständi-

1) In Heidelberger 1976 wurde die verschiedene Verwendungsweise einer Theorie am Beispiel der Kopernikanischen Theorie gezeigt: Die Anwendung dieser Theorie auf die Positionen der Planeten auf dem Himmelsgewölbe war nicht revolutionär; erst die Anwendung der Theorie auf das Planetensystem als einem dreidimensionalen Gebilde, also auch auf die Distanzen der Himmelskörper untereinander, war revolutionär.

gen. Ob man jedoch $\bar{I}$ oder $\bar{I}'$ als Fortsetzung der paradigmatischen Anwendung ansieht, ist eine Wertentscheidung, die weder mithilfe des Kerns K' , der Erfahrung, noch logischen Argumenten gerechtfertigt werden kann.

Mit der Menge I^+ ist also auf eine relativ einfache Weise der Bereich gefunden, in dem nach Kuhn die Kommunikation zwischen Wissenschaftlern, die verschiedenen Paradigmen anhängen, trotz verschiedener Bedeutungen der Begriffe, aufrecht erhalten werden kann. $\bar{I}$ und $\bar{I}'$ sind die Bereiche, in denen die Kommunikation bei einer Revolution zusammenbricht; bezüglich $\bar{I}$ und $\bar{I}'$ sind die Theorien inkommensurabel.¹

Bis jetzt haben wir den Wandel der Verwendungsweise einer Theorie in einer Revolution extensional charakterisiert, indem wir die Möglichkeit aufgezeigt haben, daß sich I^+ in $\bar{I}$ und $\bar{I}'$ spalten kann. Der tiefere Grund für diese Verzweigung liegt jedoch in dem Umstand, daß die paradigmatischen Beispielmengen, an denen die Wissenschaftler ihre Wissenschaft jeweils gelernt haben, unterschiedlich sind und daß ein Teil der neuen paradigmatischen Anwendungsmenge nicht in I^+ liegt. Je mehr sich die paradigmatischen Anwendungsmengen I_0 und I'_0 voneinander unterscheiden und je weniger von I'_0 in I^+ liegt, desto kleiner wird der gemeinsame Bereich I^+ ausfallen und desto stärker und umfassender ist die wissenschaftliche Revolution.

Wenn wir in die Explikation des Revolutionsbegriffs

1) In $\bar{I}$ und $\bar{I}'$ schlägt sich ein Teil der Restrukturierung der intendierten Anwendungen einer Theorie nieder, von der Kuhn in 1976, 195 spricht: "one of the things...that changes in every scientific revolution is some part of the network of similarity relations that determines and →

als Bedingung mit hineinnehmen, daß sich die paradigmatischen Anwendungen zweier Theorien bei einer Revolution unterscheiden müssen, dann haben wir auch ein Explikat für den "Wandel der Sichtweise", der nach Kuhn in einer Revolution wesentlich mit im Spiele ist. Auch dies kann durch Rückgriff auf Ludwig Wittgensteins Spätphilosophie plausibel gemacht werden. Dort setzt nämlich Wittgenstein den "Wandel in der Anschauungsweise eines Bildes" gleich mit dem "Vergleich des Bildes mit einem anderen Paradigma" ('Vergleich' im Sinne von 'eine Ähnlichkeitsbeziehung konstatieren'). In § 144 der 'Philosophischen Untersuchungen' untersucht Wittgenstein, wie man die Verwendungsweise eines Bildes durch jemanden verändern kann: "Ich möchte doch, daß du sagst: 'Ja, es ist wahr, das könnte man sich auch denken, das könnte auch geschehen!' - Aber wollte ich Einen darauf aufmerksam machen, daß er imstande ist, sich dies vorzustellen? — Ich wollte dies Bild vor seine Augen stellen, und seine Anerkennung dieses Bildes besteht darin, daß er nun geneigt ist, einen gegebenen Fall anders zu betrachten: nämlich ihn mit dieser Bilderreihe zu vergleichen. Ich habe seine Anschauungsweise geändert. (Indische Mathematiker: 'Sieh dies an!')"¹ Analog übertragen auf die Naturwissenschaft könnte man sagen: Die Anerkennung einer paradigmatischen Menge von Anwendungen I'_0 , die sich von einer früheren Menge I_0 unterscheidet, besteht darin, daß ein Wissenschaftler nun geneigt ist, einen gegebenen Fall, eine physikalische Entität

1) Wittgenstein 1953, § 144

← Fortsetzung von S.221: simultaneously gives structure to the class of intended applications."

anders zu betrachten: nämlich ihn mit diesem I'_0 zu vergleichen (anstatt mit dem früheren I_0) und ihn als der Menge $\bar{I}'$ zugehörig zu klassifizieren. Seine Anschauungsweise hat sich geändert.

Im folgenden werden alle Elemente, die in der bisherigen Diskussion zur adäquateren Explikation des Revolutionsbegriffes vorgeschlagen worden sind, in einer neuen Definition zusammengefaßt, die die alte Definition D 1 präzisieren und ersetzen soll.

Seien $D(I)$ und $D(I')$ wieder diejenigen Mengen von Individuenbereichen, die dadurch entstehen, daß bei den Mengen der intendierten Anwendungen I bzw. I' die nicht-theoretischen Funktionen weggestrichen werden. Unter I^+ sei die Durchschnittsmenge von I und I' verstanden, also $I^+ = I \cap I'$. Unter $A(K)$ wird (mit Sneed und Stegmüller) die Menge der möglichen intendierten Anwendungen einer Theorie verstanden.¹

Def. R 1 : Eine Theorie T ist durch eine Revolution erster Art von T' getrennt gdw.

- (1) $T = \langle K, I, I_0 \rangle$ und $T' = \langle K', I', I'_0 \rangle$ und T, T' sind physikal. Theor. i. Sinn v. Kuhn
- (2) T' ist eine zeitlich direkt nach T aufgestellte Theorie
- (3) Die mathematische Grundstruktur von K ist nicht identisch mit derjenigen von K'
- (4) $D(I) \cap D(I') \neq \emptyset$
- (5) $I \cap I' \neq \emptyset$ (d.h. $I^+ \neq \emptyset$)

1) Stegmüller 1973, 125, 129, 133

$$(6) I_0 \neq I'_0 \text{ und } I'_0 \neq I^+$$

- (7) Es gibt eine nichtleere Menge $\bar{I} \subseteq I - I^+$ und
 es gibt eine nichtleere Menge $I' \subseteq I' - I^+$,
 so daß $I^+ \cup \bar{I} \in \Delta(K')$ und $I^+ \cup I' \in \Delta(K')$
 und $I^+ \cup \bar{I} \cup I' \notin \Delta(K')$

Die Bedingungen R 1 (1)-(5) sind identisch mit D 1 (1)-(5) (vgl. oben S.201). In (6) wird ausgedrückt, daß sich die paradigmatische Beispielsmenge, an der die Anwendungen einer Theorie gelehrt werden, geändert hat. Dabei soll mindestens eine der neuen paradigmatischen Anwendungen nicht in der Menge I^+ liegen, über die sich die Anhänger von T und T' evtl. rational verständigen können. Durch weitere Untersuchungen von wissenschaftlichen Revolutionen muß über die Frage entschieden werden, ob diese Bedingung als eine notwendige für das Vorliegen einer Revolution gefordert werden soll. Durch (7) ist die Übertragung der normalwissenschaftlichen Anwendungsverzweigung auf den revolutionären Fall gewährleistet.

Durch die Bedingung (7) wird eine Möglichkeit von möglichen Verzweigungen von Theorien im revolutionären Fall induziert.¹ Es handelt sich dabei um die Theorie, die mit T' zwar K' und I'_0 gemeinsam hat, sich aber von I' unterscheidet. Es wäre das insbesondere eine Theorie $T'' = \langle K', \{I^+ \cup \bar{I}\}, I'_0 \rangle$. Nach den in R 1 verlangten Kriterien wäre T'' nicht revolutionär im Vergleich zu T, obwohl ein neuer Kern vorgelegt wurde. Vom neuen Kern werden nämlich dieselben Anwendungen wie vom alten Kern

1) Stegmüller hat die Möglichkeit einer revolutionären Theorienverzweigung allgemein im Hinblick auf mögliche Reduktion in 1976, 172ff. diskutiert.

gemacht und keine neuen. T' ist also u.a. deshalb revolutionär, weil einige Anwendungen nicht übernommen werden.

Wie leicht zu sehen ist, berücksichtigt R 1 nur eine Möglichkeit der revolutionären Verzweigung von Anwendungen. Ein anderer Fall, der sogar noch häufiger in der Geschichte der Naturwissenschaft vorkommt, tritt dann ein, wenn eine Anwendung der alten Theorie keine Anwendung der neuen Theorie darstellt. Diese Möglichkeit im Wandel der Verwendungsweise wird in einer weiteren Definition präzisiert:

Def R 2 : Eine Theorie T ist durch eine Revolution zweiter Art von T' getrennt gdw.

(1) - (6) wie R 1

(7) Es gibt eine nichtleere Menge $\bar{I} \subseteq I - I^+$,
so daß $I^+ \cup \bar{I} \in \Lambda(K)$ und $I^+ \cup \bar{I} \notin \Lambda(K')$

Der Existenzquantor in R 1 (7) und R 2 (7) ist ein 'historischer', kein logischer, d.h. von einer Revolution kann nur dann gesprochen werden, wenn man geschichtlich konkret belegen kann, daß sich die Verwendungsweise eines alten Theoriekerns gegenüber der Verwendungsweise des neuen Kerns unterscheidet (R 2), oder daß sich die Verwendung des neuen Theoriekerns in eine alte Verwendungsweise und eine neue Verwendungsweise aufspaltet, wobei man sich für die neue Weise entschieden hat (R 1), oder beides zusammen. R 1 und R 2 schließen sich also nicht gegenseitig aus, sondern können sich sogar ergänzen.

Wir haben gesehen, daß die Ohmsche Revolution nach R 1 beschrieben werden kann. Sie kann aber auch nach R 2 beschrieben werden. Um dies zu zeigen, müssen wir eine Anwendung der bzw. einer vorohmschen Theorie vorweisen können, die keine Anwendung der Ohmschen Theorie T' darstellt. In der Tat existiert eine solche Anwendung, die sogar einen paradigmatische Fall für die Erklärung der Elektrizitätsleitung in der Coulombschen Elektrizitätslehre darstellt. Es handelt sich dabei um eine elektrisch geladene Kugel, die ihre Elektrizität längs isolierender Stützen verliert. (Siehe dazu oben S. 56f) In Coulombs Theorie erhielt dieser Elektrizitätsverlust eine Erklärung, in Ohms Theorie läßt er sich nicht mehr erklären. Die intendierte Anwendung, die die Theorie Coulombs erklären kann und die Ohm nicht erklären kann, besteht also aus einer Kugel, einem unvollkommenen Leiter und Meßwerten, die die Ladung der Kugel, die Ladung am Drahtende und die geometrischen Abmessungen des Experiments betreffen.

Nach Kuhns Metatheorie gehen in einer Revolution auch immer erfolgreiche Erklärungen der alten Theorie verloren: die Vorgängertheorie kann häufig Rätsel lösen, die die neue Theorie nicht mehr lösen kann. Manchmal können die Probleme der alten Theorie nicht einmal mehr in der neuen Theorie formuliert werden.¹ Das Vorliegen solcher Fälle wird in R 2 (7) gefordert: Aus $I^+ - I \cap I^+ \text{ und } I^+ \cup \bar{I} \notin A(K)$ folgt, daß $\bar{I} \notin I^+$. In $\bar{I}$ zeigt sich genau der Verlust an Erklärungskraft, der sogenannte

1) In Ohms Theorie können keine Probleme mehr formuliert werden, die das "Wesen" der Elektrizität betreffen, wie es im vorohmschen Atomismus und Dynamismus noch möglich war.

"Kuhn - loss".¹

Neben R 1 und R 2 ist noch ein weiterer Typ einer Revolution denkbar, der sich weder mit D 1 noch mit R 1 und R 2 vereinbaren läßt. Wir hatten den Grundgedanken, die Definition D 1 so zu verbessern, daß sich das Auftreten einer wissenschaftlichen Revolution hauptsächlich durch das Auftreten einer neuen Verwendungsweise des Theoriekerns manifestiert. Eine radikal neue Verwendungsweise ist aber schon dann gegeben, wenn die neue Theorie ^{zwar} mit der alten Theorie Individuenbereiche gemeinsam hat, aber überhaupt keine physikalischen Systeme mehr! Dieser Fall schien in der bisherigen Diskussion so unwahrscheinlich zu sein, daß er gar nicht berücksichtigt wurde.² Es zeigt sich aber gerade an der Ohmschen Wende, daß dieser Fall möglich ist! Als wir davon gesprochen haben, daß Ohms Theorie von den Coulombschen Theorien im Sinne von R 1 und R 2 durch eine Revolution getrennt ist, haben wir vorausgesetzt, daß beide Theorien einen Bereich von physikalischen Systemen gemeinsam haben, daß es in I'Anwendungen gibt, die dasselbe besagen wie Anwendungen aus I. Unter diesen physikalischen Anwendungen müssen wir bei der Ohmschen Wende solche physikalische Entitäten verstehen, an denen Messungen mit dem Galvanometer vorgenommen werden. In Ohms Theorie ist, wie sich später noch deutlicher heraus-

-
- 1) vgl. Kuhn 1962, 119, 158, 167, 178; Kuhn 1976, 192. Vgl. auch Laudan 1976, 539ff. für viele Beispiele, sowie P. Feyerabend in Lakatos 1974 und A. Grünbaum, Brit. Journ. Phil. Sci. 27, 1976, 1-23.
- 2) Für Kuhn scheint nach 1976, 192 & 195 dieser Fall möglich zu sein, während er nach Stegmüller 1976, 170 ausgeschlossen zu sein scheint.

stellen wird, die Funktion der "Stromgröße" (Stromstärke) T-nicht-theoretisch und der Begriff der "elektroskopischen Kraft" (entspricht in etwa der Spannung) T-theoretisch. Wir haben weiter oben gesehen, daß z.B. Humphry Davy die Behandlung des fließenden Stromes im geschlossenen Stromkreis nach dem Coulombschen Paradigma durchführt, gleichzeitig jedoch die Coulombschen Elektrometermessungen einfach durch Galvanometermessungen ersetzt. In diesem Sinne könnten wir sagen, daß Ohms Theorie und Davy's Theorie Anwendungen besitzen, die in beiden Theorien dieselben sind - Ohms Theorie und das Coulombsche Paradigma in Davys Fassung haben physikalische Systeme gemeinsam. Nimmt man aber geeignete physikalische Entitäten plus Messungen mit dem Elektrometer als die Anwendungen der speziellen Coulombschen Theorie her, so spricht die Theorie vor Ohm über kein einziges System, über das Ohm spricht und umgekehrt.

Erst ab 1846 wurde es erstmals innerhalb der Elektrizitätslehre theoretisch begründbar, daß Messungen mit dem Elektrometer und Messungen mit dem Galvanometer beide als Messungen ein und derselben Kraft aufgefaßt werden können. 1846 hat nämlich Wilhelm Weber sein "allgemeines Grundgesetz der elektrischen Wirkung" aufgestellt. Wenn wir also Webers Gesetz als gemeinsame Meßtheorie für Coulombs und Ohms Theorie voraussetzen, dann erst kann man sagen, daß es physikalische Systeme gibt, die "dieselben" in beiden Theorien sind. Der Begriff der

elektrischen Kraftwirkung erweist sich als T-theoretisch in Bezug auf Webers Theorie, wobei nach dieser Theorie sowohl Elektrometer-, als auch Galvanometermessungen als Messungen von Kraftwirkungen gelten, die in Ohms und Coulombs Theorie T-nicht-theoretisch sind.

Diese Gedanken berücksichtige ich in der folgenden Definition einer wissenschaftlichen Revolution dritter Art:

Def. R 3 : Eine Theorie T ist durch eine Revolution dritter Art von T' bezüglich einer Meßtheorie $\mathcal{T}$ getrennt gdw.

(1) $T = \langle K, I, I_0 \rangle$ und $T' = \langle K', I', I'_0 \rangle$ und T, T' sind physikalische Theorien im Sinne von Kuhn und $\mathcal{T}$ ist eine Meßtheorie, die T und T' zugrundeliegt.

(2) - (4) wie R 1 (s.o.S. 223)

(5) $I \cap I' = \emptyset$

(6) Die Messungen von I und I' können bezüglich $\mathcal{T}$ nicht identifiziert werden.

Diese Definition enthält den Begriff der Meßtheorie, der nur intuitiv erläutert wurde. Wir erinnern daran, daß wir unter einer Meßtheorie bezüglich einer Theorie T jede T zugrundeliegende Theorie verstehen. Es würde im Rahmen dieser Arbeit zu weit führen, einen Begriff der Meßtheorie zu definieren, der für solche Fälle wie die Ohmsche Wende überall adäquat ist. Für die Definition R 3

genügt die Intuition, daß $\mathcal{T}$ wenigstens dann eine Meßtheorie für T und T' darstellt, wenn alle nicht-theoretischen Begriffe aus T und T' theoretisch sind in Bezug auf $\mathcal{T}$.¹ Wenn man die neuen verbesserten Definitionen R 1 bis R 3 akzeptiert, dann stellt sich sofort die Frage, wie sich der neue Revolutionsbegriff zum Reduktionsbegriff bzw. Fortschrittsbegriff verhält. Ist es möglich, daß eine Theorie T, die von einer Theorie T' durch eine Revolution getrennt ist im Sinne von R 1 - R 3, auf T' reduziert werden kann? Wenn man den inhaltlich-philosophischen Begriff der Reduktion zugrundelegt, wie er S. 206f. diskutiert wurde, fällt die Antwort negativ aus. Es ergibt sich folgendes Theorem:

TH : Wenn eine Theorie T von einer Theorie T' durch eine Revolution im Sinne von R 1, R 2 oder bezüglich einer Meßtheorie $\mathcal{T}$ von R 3 getrennt ist, dann ist T nicht auf T' reduzierbar.

Wir erinnern daran, daß in einer inhaltlich verstandenen Reduktion jede intendierte Anwendung der reduzierten Theorie auf mindestens eine intendierte Anwendung der reduzierenden Theorie abgebildet wird, so daß die aufeinander abgebildeten intendierten Anwendungen dasselbe Objekt in jeweils verschiedener Weise beschreiben.¹ Eine Theorie T ist also dann auf T' nicht reduzierbar, wenn es eine intendierte Anwendung von T gibt, zu der es keine Menge von intendierten Anwendungen in T' gibt, die ihr entsprechen.

1) Vgl. Stegmüller, 1973, 145; Sneed 1971, 219f. und oben S. 206f.

Für R 2 und R 3 genügt es zu zeigen, daß es jeweils eine Menge von intendierten Anwendungen gibt, die Element von $A(K)$ ist, aber nicht von $A(K')$, wenn K und K' die Kerne von T und T' sind und T auf T' reduziert wird. In R 2 (7) ist gefordert, daß es eine nichtleere Menge gibt, die zwar Element der möglichen Anwendungen von T aber nicht von T' ist. Nach R 3 (5) und (6) gibt es überhaupt keine Anwendungen von T' , die einer Anwendung von T entsprechen könnten. Damit ist das Theorem für R 2 und R 3 bewiesen.

Für R 1 : Aus R 1 (5) und (7) folgt $\bar{I} \cap \bar{I}' = \emptyset$. Da aber $\bar{I} \subseteq I$ und $\bar{I}' \subseteq I'$ ist, gibt es mindestens eine Anwendung aus der Menge der intendierten Anwendungen I von $T = \langle K, I, I_0 \rangle$, die keiner Anwendung (oder Menge von Anwendungen) aus der Menge der intendierten Anwendungen I' von $T' = \langle K', I', I'_0 \rangle$ entspricht. Damit ist auch der Beweis für R 3 geliefert. Dies gilt trotz der Tatsache, daß sowohl $I^+ \cup \bar{I} \in A(K')$ als auch $I^+ \cup \bar{I}' \in A(K')$. Diese Tatsache wäre hinreichend für die Möglichkeit einer formalen Reduktion. Für das Vorliegen einer inhaltlichen Reduktion müssen nicht nur die möglichen Anwendungen in der speziell definierten Weise miteinander korrespondieren, sondern auch die tatsächlichen intendierten Anwendungen. Stegmüller hat darauf hingewiesen, daß es Möglichkeiten gibt, daß ein Forscher in Grenzfällen "die Theorie selbst über die Zugehörigkeit zu I entscheiden lassen" kann.¹ Mit der Annahme der Menge $I' \cap \bar{I} = \emptyset$ hat jedoch der Forscher, der

1) Stegmüller 200ff., hier S.202. Vgl. auch 1976, 166.

über T' verfügt, genau in diesem Sinne die Theorie darüber entscheiden lassen, daß $\bar{I}$ nicht in I' aufgenommen werden soll, obwohl das möglich wäre. Diese Entscheidung wird deshalb gefällt, um eine eindeutig bestimmte Menge von intendierten Anwendungen I' durch die paradigmatische Beispielmenge I_0 auszuzeichnen und Verzweigungen der Menge I^+ in mehrere derartig bestimmte Mengen von intendierten Anwendungen für ein und dieselbe Theorie zu vermeiden. Wie schon erwähnt, ist diese Entscheidung eine Wertentscheidung, die uns keine noch so große Menge an Erfahrung abnehmen kann.

Wir fassen zusammen, warum wir die Neufassung des Revolutionsbegriffes in den drei vorgelegten Definitionen R 1 - R 3 für eine Verbesserung gegenüber der Definition D 1 halten:

1. Die Ohmsche Wende läßt sich durch R 1, R 2, R 3 differenzierter und adäquater fassen.
2. Kuhns Intuition, daß eine Revolution neben dem Wandel von Gesetzen (d.h. hier: mathematischen Grundstrukturen) besonders auch den Wandel von Sichtweisen, Begriffsbe-deutungen, Normen und Methoden beinhaltet, läßt sich leichter und realistischer beschreiben.
3. Putnams Adäquatheitsforderung, nicht Ideen, sondern Anwendungen der Ideen als die primären Merkmale einer Theorietradition und des Theoriwandels anzusehen, kann Rechnung getragen werden.

Diese Vorteile des neuen Begriffs sind jedoch um den Preis erkauft worden, daß der Begriff des wissenschaftlichen Fortschritts nicht mehr durch die Reduktion einer revolutionär verdrängten Theorie T auf die Ersatztheorie T' expliziert werden kann, wie Stegmüller das wollte.¹

Der Reduktionsbegriff hat damit jedoch nicht seine Berechtigung verloren. Hat man nämlich gezeigt, welcher maximale Teil von T sich auf T' reduzieren läßt, so hat man damit eingegrenzt, was die Vertreter der Theorie T' als Erfolg der Theorie T anzuerkennen bereit sind und was nicht.

1) Stegmüller 1973, 249

4.5 Rekonstruktion in Sneeds Metatheorie

Bisher wurde immer nur über Theoriekerne der Theorien Ohms und seiner Vorgänger gesprochen, ohne diese Kerne explizit anzugeben. Dies soll nun nachgeholt werden. Eine Schwierigkeit in diesem Unternehmen ergibt sich aus der Tatsache, daß die Vorgängertheorien von Ohm nur zu einem geringen Maße Theorien der mathematischen Physik waren. Die Sneedsche Metatheorie ist bisher noch nicht so weit entwickelt worden, daß sie auch auf nicht-quantitative Theorien, die nur qualitative Aussagen machen, eine befriedigende Anwendung gefunden hätte.

Als eine der wichtigsten Vorohmschen Theorien erwies sich Coulombs elektrostatische Theorie (s.o.S.56ff), deren Grundprädikat nun vorgestellt werden soll. Zur Bezeichnungweise: $f : D \rightarrow \mathbb{R}$ soll im folgenden heißen: f ist eine Funktion, von D als Argumentbereich nach $\mathbb{R}$ (hier die reellen Zahlen) als Wertebereich.

P 1 : X ist ein Coulombsches Kraftsystem gdw.

es gibt D, δ, a, F , so daß:

$$(1) X = \langle D, \delta, a, F \rangle$$

(2) D ist eine nichtleere endliche Menge von elektrisch geladenen Körpern

$$(3) \delta : D \rightarrow \mathbb{R}_+ \quad \text{Ladung eines Körpers}$$

$$(4) a : D \times D \rightarrow \mathbb{R}_+ \quad \text{Abstand eines Körpers v. andern}$$

$$(5) F : D \times D \rightarrow \mathbb{R}_+ \quad \text{Kraft, die zwischen 2 Körpern wirkt}$$

(6) Für alle $p, q \in D$, wobei $p \neq q$ gilt:

$$F(p, q) = \frac{\delta(p) \cdot \delta(q)}{a^2(p, q)}$$

Dies ist das Grundprädikat der Coulombschen Theorie. Jede Entität, der dieses Prädikat eines Coulombschen Kraftsystems zukommt, ist ein Modell der Theorie. δ und a sind T-nicht-theoretische Größen, während F T-theoretisch ist.¹

Dieses Grundprädikat wurde von Coulomb erweitert, um auch den Fall der elektrischen Leitung eines Drahtes, d.h. eigentlich der "Aufladung eines Drahtes", der an eine statische Ladung angelegt wird, behandeln zu können:

P 2 : X ist ein Coulombsches Leitungssystem gdw.

es gibt D, δ, a, F, F^+, B , so daß

$$(1) X = \langle D, \delta, a, F, F^+, B \rangle$$

(2) - (6) wie P 1

$$(7) F^+ : D \rightarrow R_+ \quad \text{Molekularkraft}$$

$$(8) B : D \times D \rightarrow R_+ \quad \text{spezif. Widerstand des Materials zwischen } p \text{ und } q \in D$$

(9) Sei $p \in D, q \in D, p \neq q, \delta(q) \leq \delta(p)$: Dann gilt:

$$B(p, q) \cdot a(p, q) = F(p, q) - F^+(q)$$

Der Widerstand $B \cdot a$ eines a langen Drahtes erscheint also wie ein Kraftverlust bei der mechanischen Reibung. Für dieses Prädikat, das eine Kernerweiterung von P 1 leistet, werden zwei neue T-theoretische Begriffe eingeführt: der Begriff B des spezifischen, oder wie Coulomb sagt, idioelektrischen Widerstandes und F^+ , der Begriff der Molekularkraft, die auf einen geladenen Punkt wirkt; d.h. die Wirkung der in unmittelbarer Nachbarschaft von $q \in D$ auf q wirkenden Ladung.

1) zum Begriff der T-theoretischen Größe vgl. Stegmüller 1973, 45ff.

Coulomb hat die in (9) erscheinende Formel einer (streckenweise unverständlichen) Analyse unterworfen und eine äquivalente Gleichung dafür gefunden, die wir in P 3 einbauen:

P 3 : X ist ein spezielles Coulombsches Leitungssystem

gdw. es gibt D, δ, a, F, F^+, B , so daß

(1) - (8) wie P 2

(9) Sei $p \in D, q \in D, p \neq q, \delta(q) \leq \delta(p)$. Dann:

$$B(p, q) \cdot a(p, q) = \delta^2(p) - \delta^2(q)$$

Humphry Davy übertrug die Idee des elektrischen Widerstandes als eines mechanischen Reibungswiderstandes auf den Draht, durch den die Elektrizität einer Voltaschen Säule entladen wird. (s.o.S. 63ff) Es finden sich bei ihm nur vage quantitative Andeutungen, aber folgendes Prädikat kann mindestens rekonstruiert werden:

P 4 : X ist ein Davy'sches Leitungssystem gdw.

es gibt $D, \delta, a, F, F^+, B, Q, d, \vartheta$ so daß

(1) $X = \langle D, \delta, a, F, F^+, B, Q, d, \vartheta \rangle$

(2) - (8) wie P 2

(9) $Q : D \rightarrow \mathbb{R}_+$ Strommenge der Säule

(10) $d : D \rightarrow \mathbb{R}_+$ Querschnitt des Drahtes

(11) $\vartheta : D \rightarrow \mathbb{R}_+$ Temperatur des Drahtes

(12) sei $p \in D, q \in D, \delta(p) \geq \delta(q), p \neq q$:

Wenn $F(p, q) - F^+(q) = 0$, dann

$$B(p, q) \cdot \frac{a(q) \cdot \vartheta(q)}{d(q)} = Q(p)$$

Im Unterschied zu Coulomb wird von Davy als Widerstand diejenige Menge in der Säule genommen, bei der die Kraft mit der die Säule wirkt, genauso groß ist wie die Kraft, die am Ende des Schließungsdrahtes ankommt.

Das erste Ohmsche System, das im folgenden definiert wird, entspricht der Veröffentlichung Ohms von 1825 (s.o. S.102). Es ist noch ganz im Coulombschen Geiste entstanden. Die "Reibungskraft", die der Draht auf den Stromfluß ausübt, erscheint noch in dem Ausdruck $\frac{x-k}{x}$, d.h. Kraft des Schließungsdrahtes minus Normalkraft der Stromquelle, pro Normalkraftgröße. Der Zusammenhang zum Coulombschen Gesetz ist aber nicht mehr vorhanden, weil die Kraft jetzt mit dem Galvanometer (Multiplikator) gemessen wird.

P 5 : X ist ein Ohmsches System Ω_1 gdw.

es gibt $D_1, D_2, l, d, k, x, \lambda, a$, so daß

(1) $X = \langle D_1, D_2, l, d, k, x, \lambda, a \rangle$

(2) D_1 ist ein äußerer Schließungsdraht

(3) D_2 ist eine konstante Stromquelle

(4) $l : \{D_1\} \rightarrow \mathbb{R}_+$ Länge des Schließdrahtes

(5) $d : \{D_1\} \rightarrow \mathbb{R}_+$ Querschnitt des "

(6) $k : \{D_1\} \times \{D_2\} \rightarrow \mathbb{R}_+$ Kraft des Schließdrahtes

(7) $x : \{D_2\} \rightarrow \mathbb{R}_+$ Normalkraft der Stromquelle

(8) $\lambda : \{D_2\} \rightarrow \mathbb{R}_+$ geometrische Abmessungen der Stromquelle

(9) $a : \{D_2\} \rightarrow \mathbb{R}$ Spannung der Kraft

(10) es gibt eine Funktion $f : \{D_1\} \times \{D_2\} \rightarrow \mathbb{R}$, so daß:

$$\frac{x(D_2) - k(D_1, D_2)}{x(D_2)} = f(D_1, D_2) \cdot \log\left(1 + \frac{l(D_1)}{\lambda(D_2)}\right),$$

wobei $f = f(x, d, \lambda, a)$

Der T-theoretische Begriff von Ω_1 ist a, die "Spannung der Kraft".

Das zweite Ohmsche System entspricht dem Vorschlag Ohms von 1826 (s.o.S. 103ff). Es ist schon weit entfernt von jeder "Coulombschen Normalwissenschaft", aber es bildet noch kein System, das wir auch heute noch als gültig einschätzen würden. Unter der "erregenden Kraft" versteht Ohm noch nicht die elektromotorische Kraft, sondern die Stärke der magnetischen Wirkung, die ein Schließungsdraht auf das Galvanometer ausübt, wenn seine Länge gegen Null geht.

P 6 : Z ist ein Ohmsches System Ω_2 gdw.

es gibt D_1, D_2, X, a, b, x

(1) $Z = \langle D_1, D_2, X, a, b, x \rangle$

(2) D_1 ist ein äußerer Schließungsdraht

(3) D_2 ist eine konstante Stromquelle

(4) $x : \{D_1\} \rightarrow \mathbb{R}_+$ Länge des Schließdrahtes

(5) $X : \{D_1\} \rightarrow \mathbb{R}_+$ Stärke der magnet. Wirkung

(6) $a : \{D_2\} \rightarrow \mathbb{R}_+$ erregende Kraft der Str.quelle

(7) $b : \{D_2\} \rightarrow \mathbb{R}_+$ Leitungswiderstand des unveränderlichen Teils der Leitung

$$(8) \quad x(D_1) = \frac{a(D_2)}{b(D_2) + x(D_1)}$$

Hier tauchen a und b als T-theoretische Größen auf.

Der entscheidende Umschwung geschieht mit dem nächsten Prädikat des "Ohmschen Leiters", das auch heute noch in dieser Form gelehrt werden könnte. k, u, u' sind dabei die T-theoretischen Begriffe: (s.o. S. 106ff.)

P 7 : Z ist ein Ohmscher Leiter Ω_3 gdw.

es gibt D, l, w, X, k, u, u' , so daß

$$(1) Z = \langle D, l, w, X, k, u, u' \rangle$$

(2) D ist ein homogenes, von einem konstanten Strom durchflossenes, prismatisches Leiterstück

(3) $l : \{D\} \rightarrow \mathbb{R}_+$ Länge des Leiterstücks

(4) $w : \{D\} \rightarrow \mathbb{R}_+$ Querschnitt des "

(5) $X : \{D\} \rightarrow \mathbb{R}_+$ Stärke des elektr. Stromes

(6) $k : \{D\} \rightarrow \mathbb{R}_+$ spezif. Leitfähigkeit

(7) $u : \{D\} \rightarrow \mathbb{R}_0$ {elektroskopische Kräfte am

(8) $u' : \{D\} \rightarrow \mathbb{R}_0$ {Anfang und Ende des Leiterstücks

$$(9) \quad X(D) = \frac{(u(D) - u'(D))}{l(D)} \cdot k(D) \cdot w(D)$$

$(k \cdot w)/l$ wird definiert als Leitfähigkeit, die Umkehrung als Widerstand. Die Messung dieser Größe ist für den äußeren Stromkreis nicht-theoretisch, bzw. Stücke daraus. T-theoretisch wird sie jedoch dann, wenn man sie auf die Stromquelle selbst anwendet, also z.B. behauptet: "Die Voltasche Säule ist ein Ohmscher Leiter Ω_3 ".

Das folgende Prädikat des unverzweigten Leiterkreises bildet kein vollständiges "physikalisches" Prädikat. Es wurde der größeren Übersichtlichkeit halber vom eigentlichen Prädikat des Ohmschen Stromkreises P 9 getrennt. Ohms Begriff des Stromkreises hat deswegen eine so komplizierte Fassung, weil die kontakttheoretische Hypothese mit eingebaut ist.

P 8 : X ist ein unverzweigter Leiterkreis Ω_0 gdw.

es gibt $D, E, g, \equiv$ so daß

$$(1) X = \langle D, E, g, \equiv \rangle$$

(2) D ist eine nichtleere endliche Menge von Leiterstücken s

(3) E ist eine nichtleere endliche Menge von Berührungspunkten e

(4) $g : D \rightarrow E \times E$ g ordnet jedem Leiterstück 2 Berührungspunkte zu

(5) $\equiv \subseteq E \times E$ und $\equiv$ ist eine Äquivalenzrelation, so daß gilt:

(6) $\bigwedge s \in D \bigvee e, e' \in E: g(s) = (e, e') \wedge e \neq e' \wedge e \not\equiv e'$
d.h. jedes Leiterstück hat genau zwei Berührungspunkte und der Stromkreis hat keine Schlingen

(7) $\bigwedge e \in E \bigvee! s \in D: e \in g(s)$
d.h. es gibt keine Berührungspunkte, die nicht auf einem Leiter liegen

(8) $\bigwedge e \in E \bigvee! e' \in E: e \equiv e' \wedge e \neq e'$
d.h. zu jedem Berührungspunkt gibt es genau einen weiteren, der mit ihm äquivalent ist, d.h. diesen berührt.

(9) $\bigwedge e_1, e_n \in E \left[e_1 \neq e_n \wedge e_1 \not\equiv e_n \rightarrow s_1, \dots, s_n \in D: \right.$

$$: g(s_1) = (e_1, e_2) \wedge g(s_2) = (e_2, e_3) \wedge \dots \wedge$$

$$\wedge g(s_n) = (e_{n-1}, e_n) \left. \right]$$

d.h. der Stromkreis besteht nicht aus disjunkten "Teil"kreisen

P 9 : X ist ein unverzweigter Stromkreis Ω_4 gdw.

es gibt $D, E, g, \equiv, T, l, q, \mathcal{C}, u$, so daß

$$(1) X = \langle D, E, g, \equiv, T, l, q, \mathcal{C}, u \rangle$$

(2) D ist eine nichtleere endliche Menge von homogenen prismatischen Leiterstücken

(3) E ist eine Menge von Punkten (an den Enden der Leiterstücke)

(4) $g : D \rightarrow E \times E$ und $\equiv \subseteq E \times E$, so daß

$$\langle D, E, g, \equiv \rangle \text{ ein } \Omega_0 \text{ ist.}$$

(5) T ist ein Intervall aus $\mathbb{R}_0$; $t \in T$ (Zeitintervall)

$$(6) l : D \rightarrow \mathbb{R}_+ \quad (\text{Länge})$$

$$(7) q : D \rightarrow \mathbb{R}_+ \quad (\text{Querschnitt})$$

$$(8) Q : D \rightarrow \mathbb{R}_0 \quad (\text{Menge})$$

$$(9) \mathcal{C} : D \rightarrow \mathbb{R}_+ \quad (\text{spezif. Widerstand})$$

$$(10) u : E \rightarrow \mathbb{R}_0 \quad (\text{elektroskopische Kraft})$$

(11) Für alle $t \in T$, für alle $e \in E$:

$$\frac{du(e)}{dt} = 0 \quad (\text{Stationär-Bedingung})$$

(12) für alle $e, e' \in E$:

$$|u(e) - u(e')| > 0, \text{ falls } e \neq e' \text{ und } e \neq e' \quad (\text{Kontakttheoretische Hypothese})$$

(13) für alle $t \in T$, für alle $s, s' \in D$:

$$\frac{dQ(s)}{q(s)dt} = \frac{dQ(s')}{q(s')dt} \quad (\text{Kontinuitätsbedingung})$$

(14) Sei $s_0 \in D$. Für alle $t \in T$:

$$\sum_{\substack{e \equiv e' \\ e \neq e' \\ e, e' \in E}} |u(e) - u(e')| = \frac{dQ(s_0)}{dt} \cdot \sum_{s \in D} \frac{l(s)}{\mathcal{C}(s) \cdot q(s)}$$

In der nächsten Definition wird der Ohmsche Stromkreis in der Fassung von 1841 vorgelegt, nachdem die Royal Society sich entschieden hat, das Ohmsche Gesetz als unabhängig sowohl von der kontakttheoretischen, als auch chemischen Hypothese anzusehen. In diesem Fall haben wir drei verschiedene T-theoretische Größen: den spezifischen Widerstand k , die Elektromotorische Kraft E und den Innenwiderstand R_1 .

P 10 : X ist ein Ohmscher Stromkreis Ω_5 gdw.

es gibt $D_1, D_2, I, l, w, k, E, R_a, R_1$, so daß

$$(1) X = \langle D_1, D_2, I, l, w, k, E, R_a, R_1 \rangle$$

(2) D_1 ist der äußere, schließende Teil d. Kreises

(3) D_2 ist eine Stromquelle

$$(4) I : \{D_1 \cup D_2\} \rightarrow R_0 \quad (\text{Stromstärke})$$

$$(5) l : \{D_1\} \rightarrow R_+ \quad (\text{Länge})$$

$$(6) w : \{D_1\} \rightarrow R_+ \quad (\text{Querschnitt})$$

$$(7) k : \{D_1\} \rightarrow R_+ \quad (\text{spezif. Widerstand})$$

$$(8) E : \{D_2\} \rightarrow R_0 \quad (\text{elektromot. Kraft})$$

$$(9) R_a : \{D_1\} \rightarrow R_+ \quad (\text{äußerer Widerstand})$$

$$(10) R_1 : \{D_2\} \rightarrow R_0 \quad (\text{innerer Widerstand})$$

$$(11) E(D_2) = (R_a(D_1) + R_1(D_2)) \cdot I(D_1 \cup D_2)$$

$$(12) R_a(D_1) = k(D_1) \cdot \frac{l(D_1)}{w(D_1)}$$

R_a könnte ganz eliminiert werden, indem man (12) in (11) einsetzt. Der besseren Übersichtlichkeit halber wurde jedoch diese Schreibweise beibehalten.

Die Ohmsche kontakttheoretische Hypothese kann nun wie folgt interpretiert werden, als eine zusätzliche

Bedingung über R_1 in einer Voltaschen Säule. Sei f der flüssige Teil eines Volta-Elements und m_1 , sowie m_2 die sich berührenden Metalle. Dann behauptete Ohm:

$$(13) \quad R_1(\text{eines Volta-Elements}) = (k(f) \cdot l(f)) / w(f) + \\ + (k(m_1) \cdot l(m_1)) / w(m_1) + (k(m_2) \cdot l(m_2)) / w(m_2))$$

Wie man leicht sieht, wird P 10 immer nur auf einen einzigen Stromkreis angewendet. Erst durch Aussagen über Mengen von Stromkreisen kann aber ein wichtiger Teil der Gesetzesaussagen, die in der wissenschaftlichen Praxis mit Ohms Gesetz getroffen werden, überhaupt erst formuliert werden. Diese Gesetzesaussagen werden nun erst durch die Annahme von drei zusätzlichen Nebenbedingungen gewährleistet, die intuitiv folgendes besagen: Der äußere Schließungsteil eines Stromkreises hat denselben äußeren Widerstandswert, egal in welchen Stromkreis wir ihn einschalten. Und eine in einen Stromkreis eingeprägte Stromquelle hat dieselbe elektromotorische Kraft und denselben Widerstand, gleichgültig, in welchen Stromkreis sie eingeprägt wird. Wir können diese Sachverhalte genauer wie folgt ausdrücken:

Sei $\omega, \omega' \in \Omega_5$. Dann sei $D_1(\omega)$ derjenige äußere Stromkreisteil, der der Anwendung ω entspricht, und $D_2(\omega)$ sei diejenige Stromquelle, die der Anwendung ω entspricht. Analog auch für ω' . Dann gilt:

Für alle Stromkreise $\omega, \omega' \in \Omega_5$ gilt:

- (1) wenn $D_1(\omega) = D_1(\omega')$, dann $R_a(D_1(\omega)) = R_a(D_1(\omega'))$
- (2) wenn $D_2(\omega) = D_2(\omega')$, dann $R_1(D_2(\omega)) = R_1(D_2(\omega'))$
- (3) wenn $D_2(\omega) = D_2(\omega')$, dann $E(D_2(\omega)) = E(D_2(\omega'))$

Aus der Formulierung der mengentheoretischen Prädikate wird sofort ersichtlich, daß die Coulombschen Be-

griffe P 1 - P 4 schon deswegen auf keinen der Ohmschen Begriffe reduziert werden können, weil die physikalischen Systeme nicht miteinander korrespondieren; bzw. es wird nichts über diese Korrespondenz ausgesagt. Wir erinnern uns, daß eine intendierte Anwendung immer aus Individuen plus nicht-theoretischen Funktionen besteht. Im Falle der Coulombschen Prädikate haben wir als nicht-theoretische Funktion (neben den geometrischen Abmessungen der Versuchsanordnung) diejenige Größe, die mit einem Elektrometer bestimmt wird. Bei Ohm taucht jedoch als nicht-theoretische Funktion eine Größe auf, die mit dem Multiplikator (= Galvanometer) gemessen wird. Allerdings gab es Forscher, die, wie wir weiter oben gesehen haben, einfach das Davysche oder sonst ein Coulombsches Prädikat auf die Leitung in einem Draht anwenden, indem einfach die Coulombsche Messung durch das Elektrometer ersetzt wird durch eine Galvanometermessung, ohne jedoch die Identität von beiden Messungen zu behaupten. Da man aber beide Größen als Kraftgrößen ansah, schien es gerechtfertigt zu sein, diese Ersetzung vorzunehmen.

Streng genommen können erst mit der Einführung des allgemeinen "Grundgesetzes der elektrischen Wirkung" von Wilhelm Weber 1846 (und natürlich später in Maxwells System), in dem das elektrostatische Grundgesetz von Coulomb und das elektrodynamische Grundgesetz von Ampère zusammengefaßt sind, die mit Elektrometer und Galvanometer gemessenen Größen identifiziert werden.

Die Kraft, die eine ruhende Ladung ausübt, wird als Grenzfall der Kraft angesehen, die eine bewegte Ladung ausübt. Es ergab sich dann in der Untersuchung von Weber und Kohlrausch, daß das Verhältnis von elektrodynamischer zu elektrostatischer Ladungseinheit ungefähr der Lichtgeschwindigkeit mal $\sqrt{2}$ entspricht. Erst mit Webers Gesetz also wäre die notwendige Bedingung für eine Reduktion der Coulombschen Theorie auf die Ohmsche Theorie überhaupt gegeben.

P 11 : X ist ein Webersches System gdw.

es gibt D, T, r, e, c, F , so daß

- (1) $X = \langle D, T, r, e, c, F \rangle$
- (2) D ist eine Menge von elektrisch geladenen Teilchen; D ist nichtleer und endlich
- (3) T ist ein Intervall reeller Zahlen (Zeitinterv.)
- (4) $r : D \times D \times T \rightarrow \mathbb{R}^3$ und r ist in T zweimal nach T differenzierbar
- (5) $e : D \rightarrow \mathbb{R}_0$ Größe der Ladung
- (6) c ist eine reelle Zahl
- (7) $F : D \times D \times T \rightarrow \mathbb{R}^3$ und für alle $p, q \in D$ und $t \in T$: $F(p, q, t)$ ist absolut konvergent
- (8) für alle $p, q \in D, t \in T$:

$$F(p, q, t) = \frac{e(p) \cdot e(q)}{r(p, q, t)^2} \left\{ 1 - \frac{1}{c^2} \left[(Dr(p, q, t))^2 - 2r(p, q, t) D^2 r(p, q, t) \right] \right\}$$

oder, in der gewohnteren Schreibweise:

$$F = \frac{e \cdot e'}{r^2} \left(1 - \frac{1}{c^2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{2r}{c^2} \cdot \frac{d^2 r}{dt^2} \right)$$

Die Behandlung der Orts- und Kraftfunktion folgt in wesentlicher Hinsicht der Orts- und Kraftfunktion aus der Mechanik in der Formulierung Sneeds.¹ Die Größe e wird bei Weber mit dem Dynamometer gemessen und ist T-nicht-theoretisch. C und F sind T-theoretische Größen. dr/dt ist der Betrag, mit dem der Abstand zwischen den geladenen Teilchen p und q wächst, d^2r/dt^2 ist die relative Beschleunigung dieser Abstandszunahme.

Aus der Tatsache, daß die intendierten Anwendungen von Coulombs und Ohms Theorien nur mithilfe des Weber-schen Gesetzes miteinander verglichen werden können, ergibt sich eine interessante Konsequenz für Stegmüllers Fortschrittsbegriff. Durch Stegmüllers Formulierung wird suggeriert, daß bei der Aufstellung eines neuen revolutionären Theoriekerns immer klar ist, 1. daß intendierte Anwendungen der einen Theorie mit intendierten Anwendungen der anderen Theorie korrespondieren und 2. daß trivial bekannt ist, welche Anwendungen es sind. Es hat sich jedoch für den Ohmschen Fall herausgestellt - und es steht zu vermuten, daß es für die meisten Revolutionen gilt - daß diese Tatsachen bei Aufstellung des neuen Theoriekerns nicht bekannt sind. Die Aufstellung einer neuen Theorie ist aber, nach Stegmüllers Kriterium, nur dann fortschrittlich, wenn ein Zusammenhang zwischen intendierten Anwendungen der einen Theorie mit denen der anderen Theorie hergestellt werden kann. Die Rationalität der Wissenschaftsentwicklung erweist

1) Sneed 1971, 114

sich auch nach Stegmüllers Kriterium als "non-instant-rationality" im Sinne von Lakatos. Die Einführung einer neuen Theorie, deren Anwendungen sich nicht mit den Anwendungen der Vorgängertheorie überlappen, kann niemals abschließend als nicht fortschrittlich eingestuft werden. Meist stellt sich erst im Nachhinein oder überhaupt nie heraus, daß die Einführung eines neuen Gesetzes nach diesem Kriterium rational war.

Wenn man nun das Webersche Gesetz als gültig voraussetzt, kann dann die Coulombsche Theorie auf die Ohmsche reduziert werden? Diese Frage fällt sofort negativ aus: Coulomb spricht von ruhenden Ladungen, während Ohms Theorie "Webersch interpretiert" von Ladungen spricht, die sich konstant und gleichförmig gegeneinander bewegen.

4.6 Nochmals zur Theoretisierung

In 4.4 ist offen geblieben, woher in einer wissenschaftlichen Revolution die Kriterien kommen, nach denen eine neue, und in den meisten Fällen eindeutige, Praxis der Anwendung der Theorie auf die Realität gewonnen wird. Es handelt sich dabei um die Frage, wie ich ein I_0 erweitern kann zu einem I , wenn mir keine eindeutigen Vorschriften zu dieser Erweiterung gegeben sind. Für den normalwissenschaftlichen Fall ist klar, wie ein Wissenschaftler eine neue intendierte Anwendung gewinnt: er hält sich an die Praxis, die in der Normalwissenschaft Gültigkeit hat und die er gelernt hat. Er "folgt einer Regel", im Sinne von Wittgenstein, d.h. er verhält sich einer sozialen Praxis konform. Für den Fall der wissenschaftlichen Revolution kann die Anwendung einer Theorie über I_0 hinaus nicht durch Hinweis auf eine Regel gerechtfertigt werden, denn es soll ja erst eine neue Regel konstituiert werden. Es ergeben sich zwei Möglichkeiten für die Entstehung dieser Praxis: entweder wird sie einfach neu erfunden, oder sie schließt sich an ähnliche Praktiken in anderen Gebieten an. Die erste Alternative wird im historischen Fall sehr unwahrscheinlich sein. Für den Ohmschen Fall gilt sie sicherlich nicht. Einige Aspekte (genauer: die Ebenen 1 bis 4, S. 179-185 oben), mit denen der Wandel der Elektrizitätslehre zu Ohms Zeit beschrieben wurde, waren nicht Ohms Werk; es waren Veränderungen der wissenschaftlichen Praxis, an denen Ohm

teilhat, ^{die er} nicht neu schafft. Ein Teil dieser übergeordneten Praxis, an der Ohm teilhat, wurde im ersten Teil dieser Arbeit die Praxis der Theoretisierung von Wissensgebieten genannt. Ohms Theorie ist in diesem Sinne ein Beitrag zu einer erst später völlig durchgeführten Theoretisierung der Elektrizitätslehre.

Die Sicht der Erfahrung, an der Ohm teilhat, ist von der Physik in Frankreich seit der Revolution (besonders von Fourier) vorexerziert worden¹ und ist neuartig und revolutionär für die Baconischen Wissenschaften. In einer anderen Form, die nicht unbedingt Mathematisierung beinhaltet, haben auch andere Wissenschaften wie Botanik, Zoologie, Geologie, Nationalökonomie usw. an diesem Wandel teilgenommen. Der Wandel der baconischen Gebiete der Physik zur mathematisch-theoretischen Physik ist also nur Teil eines allgemeinen Theoretisierungsprozesses, der die baconischen Wissensformen und die klassischen, in der Antike vorgeprägten, Wissenschaften vereinigen möchte und die Naturwissenschaften allgemein der Philosophie entfremdet und von ihr löst.

Diesen Doppelcharakter einer wissenschaftlichen Revolution - die Wandlung der begrifflichen, den Inhalt determinierenden, Instrumente einerseits und die Wandlung der die Inhaltsform determinierenden Sehweise andererseits - möchte ich nun in Zusammenhang bringen mit dem Begriff der Theoretisierung, wie er oben im Abschnitt 1., speziell 1.24 skizziert wurde. Wie wir

1) und ^{hat} besonders von Auguste Comte eine philosophische Ausformulierung erhalten.

gesehen haben, war es möglich, das Ohmsche Gesetz bis zu einem gewissen Grade anzuerkennen in einer konservativen Rückinterpretation seines Gehalts, ohne daß die neue Sichtweise der Erfahrung mitgemacht wurde. Das geschah einmal durch einige Atomisten, die damit besser gegen die Chemiker auftreten zu können glaubten, dann durch einige französischsprachige Physiker und Chemiker, und schließlich durch stark anwendungsorientierte Physiker wie Vorsselman de Heer. Das Wissen um das Ohmsche Gesetz führte in diesen Fällen teilweise zu keiner (oder sehr viel später zu einer) wirklich revolutionären Umwandlung der Sichtweise und daher auch zu keiner Theoretisierung. Erst die Anerkennung des Ohmschen Gesetzes als integriertem Teil einer neuen Theorie führt zu einer Theoretisierung (bzw. neuen Theoretisierung) des Anwendungsbereiches.

Warum versuchen viele Wissenschaftler zur Zeit Ohms, ihre Wissensgebiete zu theoretisieren? Ein Grund liegt wohl darin, daß die Standards der Wissenschaften zur damaligen Zeit in eine Krise gerieten.

Schon bei Kuhn hat die Krise, die einer wissenschaftlichen Revolution vorausgeht, auch einen funktionalen Charakter, indem sie nämlich zur Erklärung des Auftretens einer wissenschaftlichen Revolution verwendet werden kann. Die hier vorgelegte Fallstudie über Ohm legt nahe, "Krise" als eine mögliche Motivation unter anderen zu sehen, die allesamt eine wissenschaftliche Umwälzung funktional erklären könnten. Der Übergang von

einer Theorie zur anderen, bzw. von einer Baconischen Wissensform zu einer Theorie könnte damit allgemein als das Resultat eines Lernprozesses beschrieben werden. Der Zusammenhang zwischen zwei aufeinanderfolgenden, durch Revolution getrennten Theorien (bzw. der Baconischen Wissensform und einer Theorie) wird dadurch folgerichtiger und verliert den Charakter der Willkürlichkeit, der ihm in der Kuhnschen Methode für viele Kritiker anzuhaften scheint.

Allerdings findet dieser Lernprozeß nicht in der eigentlichen Wissenschaft selbst statt, sondern auf einer Metaebene, denn er hat ja die Umgewöhnung an eine neue Sehweise und die Umdefinition wissenschaftlicher Standards zum Ziel und nicht die erschöpfende Anwendung und Übertragung einer schon eingeübten Praxis. Einige Motive, die für den behandelten Zeitraum der Elektrizitätslehre in Betracht kommen, haben wir schon genannt: Komplexitäts- und Erfahrungsdruck, zu langes Warten auf die Antwort auf qualitative Fragen, Unmöglichkeit einer vollständigen Abspaltung von Wissensgebieten durch eine Spezialisierung, pragmatische Motive (wie Anwendung auf die Telegraphie) und ähnliches. In diesem Katalog kann wohl höchstens der Komplexitätsdruck und das Verzögern der Problemlösungsfähigkeit unter die Kategorie der Krise eingeordnet werden.

Es könnte nun lerntheoretisch erklärt werden, warum z.B. C.H.Pfaff die ^{neue} Theoretisierung der Elektrizitätslehre

nicht mitmachte: er hat während seiner Karriere seine ganze Kraft darauf verwendet, der Voltaschen Kontakttheorie zum Sieg zu verhelfen, und wurde dadurch erfolgreich und anerkannt. Eine Übernahme der neuen Theoretisierung hätte für ihn die Verleugnung all dieser von ihm positiv gewerteten Argumentationen und Problemlösungen nach sich ziehen müssen. Sein Bruder J.W.A.Pfaff konnte sich jedoch viel leichter mit Ohms Theorie befreunden, da für ihn als einem Mathematiker nichts auf dem Spiel stand, was er durch eine (in seinem Fall fast bedingungslose) Anerkennung der Ohmschen Theorie hätte verlieren können.¹

Die Theoretisierung eines Wissensgebietes muß also in jedem Falle gelernt werden, d.h. die einmalige, auch noch so gute, erfolgreiche und umfassende Ausbildung setzt den Naturwissenschaftler (hier einmal als rationalen Idealtypus genommen, der sich mithilfe seines übernommenen Instrumentariums redlich und rational mit jeder Neuerung auseinandersetzt) keinesfalls sozusagen automatisch instand, jede Neuerung rational abschließend einzuschätzen. Bei wissenschaftlichen Revolutionen kann es eben vorkommen, daß die Voraussetzungen, die ein Wissenschaftler mitbringt, zum Erlernen der neuen Theorie und Praxis nicht ausreichen. An dieser Stelle werden verstärkt solche Faktoren wirksam, die man externe

1) Vgl. dazu auch Kuhn 1973, wo Faktoren aufgezählt werden, die darüber entscheiden, ob ein Wissenschaftler in einem neuen Gebiet arbeitet oder nicht.

nennt; d.h. Faktoren, die sich vom ökonomischen, sozialen und realgeschichtlichen Wandel in der Gesellschaft herleiten.

Vielleicht besteht Hoffnung, daß auf diesem Wege Gesetzmäßigkeiten der Ordnung der Wirksamkeit von internen und externen Bedingungen, von Real- und Idealfaktoren, gefunden werden können: Gesetzmäßigkeiten, die bestimmen, wie zu jedem Zeitpunkt die Wissenschaftlergemeinschaft in ihrer Theorie und Praxis und damit die Wissenschaft selbst, in ihrer inhaltlichen Position determiniert wird.

Schlußbetrachtung

Mit dieser Arbeit wurde versucht, eine Brücke zu schlagen zwischen der philosophischen und historischen Beschäftigung mit der Naturwissenschaft. Seit längerer Zeit gibt es zwei verschiedene Schulen der Wissenschaftsphilosophie: eine historisch und eine logisch ausgerichtete, die gegensätzliche Sichtweisen von der Naturwissenschaft implizierten.¹ Die Voraussetzungen für eine fruchtbare Kommunikation sind zwar fast dauernd gesucht und reflektiert worden, aber erst mit den Arbeiten von Sneed und Stegmüller scheint eine ernsthafte Möglichkeit gefunden zu sein, mithilfe der logischen Wissenschaftstheorie einen Beitrag zur rationalen Rekonstruktion der Geschichte der Naturwissenschaft zu leisten und damit einen interdisziplinären Dialog einzuleiten.²

In der sich vom logischen Empirismus herleitenden Wissenschaftsphilosophie versuchte man bisher, ein größeres Verständnis von jeweils einzelnen Theorien zu erreichen. Mit Sneed's Theorie wird es möglich, systematisch das Verhältnis von Theorienpaaren zu einander zu untersuchen. Die Aufgabe einer Rekonstruktion der Geschichte der Naturwissenschaft kann nun darin gesehen werden, eine möglichst vollständige Angabe der Beziehungen der hauptsächlich untersuchten Theorie zu anderen Theorien zu liefern: sowohl "vertikal" - die Beziehungen zu Vorgänger- und Nachfolgertheorien, als auch "horizontal" -

1) Stegmüller 1976, 148ff.

2) Stegmüller 1976, 150; Kuhn 1976, 181

die Beziehungen zu gleichzeitig als gültig angenommenen anderen Theorien, Meßtheorien, übergeordneten Prinzipien (wie z.B. Energieerhaltungssatz) usw. Geschichte erscheint also als eine spezielle Menge von Theorienpaaren.

Bisher wurde Sneed's Theorie noch auf kein solches Theorienpaar angewendet, dessen Elemente durch eine wissenschaftliche Revolution voneinander getrennt sind.¹ Es stand die Anwendung auf die klassische Mechanik und neuerdings die Thermodynamik im Vordergrund, wobei die konkreten tatsächlichen historischen Erscheinungsweisen der Theorien keine Berücksichtigung fanden.² Mit dieser Arbeit wurde erstmals der Versuch unternommen, die horizontalen und vertikalen Bezüge einer Theorie, wie sie tatsächlich in der Geschichte aufgetreten sind, mithilfe des Sneed'schen Formalismus zu fassen. Die Theorien, die dabei zu berücksichtigen waren, erwiesen sich als bedeutend komplexer und weniger übersichtlich, als die entsprechenden "geschichtsfreien" Theorien der Mechanik - vom wissenschaftstheoretischen Standpunkt aus gesehen.

Da also mit dem vorgelegten Unternehmen Neuland betreten wird und insbesondere die völlig adäquate, logische Meisterung einiger wichtiger Begriffe in Sneed's Theorie noch aussteht³, könnte auch diese Arbeit sicher in Zukunft noch eine genauere Ausarbeitung erfahren. Auf jeden Fall sollte sie dazu beitragen, das Wesen des wissenschaftlichen Wandels zu verdeutlichen und klarer zu machen.

1) Kuhn 1976, 190

2) Die Fixierung der Wissenschaftstheorie auf das Vorbild der Metamathematik führte zur mit Nachteilen behafteten Aussagenkonzeption. Die Fixierung auf die Mechanik als Paradigma könnte zu ähnlichen Nachteilen führen.

3) Kuhn 1976, 190ff.

Abkürzungen

Gilb. Ann. = Gilbert's Annalen der Physik, Leipzig

Pogg. Ann. = Poggendorffs Annalen der Physik und Chemie,
Leipzig

Schweigg. Journ. = Schweigger's Journal für Chemie
und Physik, Nürnberg

Phil. Trans. = Philosophical Transactions of the Royal
Society, London

Bibliographie

- Achilles, Manfred
1976 150 Jahre Ohmsches Gesetz, in: Praxis der Naturwissenschaften. Physik 25, 1-5
- Achinstein, Peter
1964 Models, Analogie, and Theories, in: Philosophy of Science 31, 1964, 328-350
1968 Concepts of Science, Baltimore/London
- Albrecht, Gustav
1885 Geschichte der Elektrizität mit Berücksichtigung ihrer Anwendungen, Wien/Pest/Leipzig (Elektrotechn. Bibliothek Bd. 28)
- Gilbert's Annalen der Physik, Leipzig 1799ff. (vorher Gren's Journal der Physik)
- Poggendorff's Annalen der Physik und Chemie, Leipzig 1824ff. (Nachfolgeorgan von Gilberts Annalen)
- Annales de chimie et de physique, ed. L.J.Gay-Lussac, F.Arago, Paris 1816ff.
- Kastner's Archiv für die gesamte Naturlehre, Nürnberg 1824ff.
- Bachelard, Gaston
1974 Epistemologie: Ausgewählte Texte, Ffm 1974 (Orig. 1971) hrsg. Dominique Lecourt
- Baer, Karl Ernst von
1864 Reden gehalten in wissenschaftlichen Versammlungen, 3 Bde. Petersburg
- Barber, Bernard
1962 Der Widerstand von Wissenschaftlern gegen wissenschaftliche Entdeckungen, in: P.Weingart hrsg., Wissenschaftssoziologie I, Ffm 1972, 205-221
- Baumgartner, Andreas
1829 Die Naturlehre nach ihrem gegenwärtigen Zustande mit Rücksicht auf mathematische Begründung, 3. Aufl. Wien
1831 Supplementband (zum vorstehenden Band), Wien
- Becquerel, Antoine César und Edmond Becquerel
1858 Résumé de l'histoire de l'électricité et du magnétisme, Paris
- Beetz, W.
1845 Das Ohmsche Gesetz mit Beispielen seiner Anwendung in der Telegraphie, in: Berlin. Telegr. Ver. Ztschr. 2, 1845, 49-66
1847 Galvanismus, in: G.Karsten hrsg., Die Fortschritte der Physik, im Jahre 1845, 1. Jahrg. Berlin
1849 (zus. mit Seebeck) Repertorium der Physik Bd. 8 Galvanismus und Akustik, Berlin
1873 Der Antheil der k. bayerischen Akademie der Wissenschaften an der Entwicklung der Elektrizitätslehre, München

- Benz, Ernst**
 1970 Theologie der Elektrizität, in: Akademie der Wiss. u. der Literatur Mainz (Hrsg.), Abhandlungen der Geistes- und Sozialwiss. Klasse Nr.12 Mainz/Wiesbaden, 689-782
- Berzelius, Jacob**
 1822ff Jahresbericht über die Fortschritte der physischen Wissenschaften. Aus dem Schwedischen. Tübingen
- Bezold, Wilhelm von**
 1861 Über die physikalische Bedeutung der Potential-Funktion in der Elektrizitätslehre, Habilitationsschrift, München
- Biggs, N.L., E.K. Lloyd, R.J. Wilson**
 1976 Graph Theory 1736-1936, Oxford
- Biot, Jean Baptiste**
 1824/25 Lehrbuch der Experimental-Physik oder Erfahrungsnaturlehre (Übersetzung der dritten frz. Aufl. von 1816 durch G.T.Fechner)
- Bochner, Salomon**
 1966 The Role of Mathematics in the Rise of Science, Princeton
- Böhme, Gernot; Wolfgang van den Daele; Wolfgang Krohn**
 1972 Alternativen in der Wissenschaft, in: Zs. f. Soziologie 1, 1972, 302-316
- Boehmer, Heinrich**
 1872 Geschichte der Entwicklung der naturwissenschaftlichen Weltanschauung in Deutschland, Gotha
- Bowers, Brian**
 1975 Sir Charles Wheatstone F.R.S. 1802-1875, London
- Brandes, Heinrich Wilhelm**
 1828 (Besprechung der Galvanischen Kette von Ohm) in: Leipziger Literatur-Zeitung 18.12.1828,nr.321, S.2562-2565
 1829 (Besprechung von Fechners Lehrbuch des Galvanismus) in: Leipziger Literatur-Zeitung 26.11.1829 nr. 295, 2353-2360
 1830 Vorlesungen über die Naturlehre IIITheile Leipzig (3.Teil 1832)
 1832 (Besprechung von Fechners Maaßbestimmungen) Leipziger Literatur-Zeitung 21.5.1832 nr.125 993-999
 1832 (Besprechung von Fechners Repertorium) Leipz. Literatur-Ztg. 2.5.1832,nr. 108, 857-860
 1827 (Besprechung von Berzelius, Jahresberichte Bd.6,1827) Leipziger Literatur-Ztg.4.9.1827 nr.225,1798-1800
- Brettner, H.A.**
 1842 Leitfaden für den Unterricht in der Physik, Breslau 8.Aufl. (17.Aufl. 1868,).

- Brown, Theodore
1969 The Electric Current in Early Nineteenth Century French Physics, in: Historical Studies in the Physical Sciences 1, 61-101
- Bryk, Otto
1909 Entwicklungsgeschichte der reinen und angewandten Naturwissenschaft im 19. Jhd. 1. Bd. Leipzig
- Caneva, Kenneth L.
1974 Georg Simon Ohm, in: Dictionary of Scientific Bibliography Band X, 186-194
1975 Conceptual and Generational Change in German Physics: The Case of Electricity 1800-1846 Dissertation, Princeton
1978 From Galvanism to Electrodynamics: The Transformation of German Physics and its Social Context, in: Historical Studies in the Physical Sciences, im Erscheinen
- Clausius, R.
1879 Die mechanische Behandlung der Electricität, Braunschweig
- Cohen, Bernard I.
1956 Franklin and Newton: An Inquiry into speculative Newtonian experimental science and Franklin's work in electricity as an example thereof, Philadelphia
- Coulomb, Charles Augustin
1785 3^e mémoire sur l'électricité et magnétisme, in: Histoire et Mémoires de l'Académie Royale, Paris 1785, 612-638
Deutsch in: W. König (hrsg.), C.A. Coulomb, Vier Abhandlungen, Ostwalds Klassiker Nr. 13 Leipzig 1890
- Crosland, M.P.
1975 (hrsg.), The Emergence of Science in Western Europe, London
- Cuvier, Georges,
1828/29 Geschichte der Fortschritte in den Naturwissenschaften seit 1789 bis auf den heutigen Tag (1827), Übs. aus d. Frz., Leipzig 4 Bde.
- Daele, Wolfgang van den; Peter Weingart
1975 Resistenz und Rezeptivität der Wissenschaft, in: Zeitschrift für Soziologie 4, 146-164
- Davy, Humphry
1840 The Collected Works of Sir Humphry Davy, London Vol. 8
- Deuerlein, Ernst G.
1939 Georg Simon Ohm 1789-1854. Leben und Wirken des großen Physikers. Erlangen 1939, 2. Aufl. 1954

- Diederich, Werner (hrsg.)
 1974 Theorien der Wissenschaftsgeschichte, Frankfurt
- Dove, Heinrich Wilhelm; Ludwig Moser
 1837f Repertorium der Physik Bd. I und II, Berlin
- DuBois-Reymond, Emil
 1848/49 Untersuchungen über thierische Electricität,
 2 Bde Berlin
 1912 Reden Bd.1, Leipzig
- Dyck, Martin
 1959 Novalis and Mathematics, Chapell Hill
 Edinburgh Philosophical Journal
- Eisenlohr, W
 1844 Lehrbuch der Physik, Mannheim 4.Aufl.
- Engelhardt, Dietrich von
 1972 Naturphilosophie und Wissenschaftstheorie auf
 den Versammlungen deutscher Naturforscher
 und Ärzte in der zweiten Hälfte des 19. Jhdts.
 in: H.Querner, H.Schipperges, Wege der Natur-
 forschung 1822-1972 im Spiegel der Versammlung
 deutscher Naturf. und Ärzte, Berlin, 68-87
- Erman, Wilhelm
 1927 Paul Erman: Ein Berliner Gelehrtenleben 1764-1851
 Berlin
- Erman, Paul
 1821 Umriss zu den physischen Verhältnissen des
 von Oersted entdeckten electrochemischen
 Magnetismus, Berlin 1821
- Euler, L.
 1806 Die Gesetze des Gleichgewichts und der Bewe-
 gung flüssiger Körper, übers., u. bearb. H.W.A.
 Brandes, Leipzig
- Farrar, W.V.
 1975 Science and the German University System 1790 -
 1850, in: Crosland 1975, 179-192
- Fechner, Gustav Theodor
 1829 Lehrbuch des Galvanismus und der Elektrochemie
 2.Aufl. der deutschen Bearbeitung von Biot 1824/5
 3. Band
 1831 Maaßbestimmungen über die galvanische Kette,
 Leipzig 1831
 1832 Repertorium der Experimentalphysik, Leipzig
 3 Bde.
- Fischer, Johann Karl,
 1798-1827 Physikalisches Wörterbuch oder Erklärung
 der vornehmsten, zur Physik gehörenden Begrif-
 fe und Kunstwörter, 10 Teile und Register
 Göttingen. 8.Teil: 480-594 "Elektrizität"
 9.Teil: 132-246 "Galvanismus", 656-698 "Leiter d.
 Electricität"
- Flachsbart, O.
 1932 Geschichte der experimentellen Hydro- und
 Aeromechanik, insbes. der Widerstands-
 forschung, in: W.Wien et al. hrsg, Handb. der
 Experimentalphysik Bd.4, 2.Teil, Leipzig S.1-61
- Fourier, Jean Baptiste
 1884 Analytische Theorie der Wärme, Deutsche ausg.
 von B.Weinstein (frz.1822) Berlin

- Fraunberger, Fritz
 1963 Elektrizität im Barock, Köln 1963
 1965 Vom Frosch zum Dynamo, Köln
 1970 Vom Kompaß bis zum Elektron, Köln
- Füchtbauer, Heinrich von
 1939 Georg Simon Ohm, Ein Forscher wächst aus seiner Väter Art, Berlin
- Gauss, Carl Friedrich
 1870ff. Werke hrsg. K.Ges.d.Wiss.z. Göttingen
- Gehler, J.S.T.
 1825-1845 Physikalisches Wörterbuch oder Erklärung der vornehmsten Begriffe oder Kunstwörter der Naturlehre, neu bearbeitet von Brandes u.a. Leipzig, 11 Bände in 23 Abteilg. + Atlas
- Gerlach, Walter
 1960 Fortschritte der Naturwissenschaft im 19. Jhd. in: Golo Mann hrsg. Propyläen Weltgeschichte, Bd 8, Berlin u.a., 235-277
 1966 Die Entwicklung der Physik der Elektrizität im 19. Jahrh., in: Technik-Geschichte 33, 356-387
- Gillmor, C.S.
 1971 Coulomb and the Evolution of Physics and Engineering, Princeton
- Gillispie, C.C.
 1965 Science and Technology, in: C.W.Crawley(ed.), War and Peace in an Age of Upheaval 1793-1830, Seite 118-145. = The New Cambridge Modern History Vol.9, Cambridge
- Gower, Barry
 1973 Speculation in Physics: The History and Practice of 'Naturphilosophie'; Studies in History & Phil. of Science 3, 301-356
- Green, George
 1828 Ein Versuch die mathematische Analysis auf die Theorien der Elektrizität und des Magnetismus anzuwenden, Ostwalds Klassiker Nr.61 Leipzig 1894 engl. Original Nottingham 1828
- Hartmann, Ludwig
 1927 (hrsg) Georg Simon Ohm: Aus handschriftlichem Nachlaß, München
- Heathcote, N.H. de Vaudrey
 1931 A Translation of the Paper in which Ohm first announced his law of the Galvanic Circuit prefaced by some Account of the Work of his Predecessors, in: Science Progress 26, 1931/2, 51-75
- Heidelberger, Michael
 1972 Zum Begriff des Kriteriums in Wittgensteins Spätwerk, Magisterarbeit

Heidelberger, Michael

- 1976 Some Intertheoretic Relations Between Ptolemean and Copernican Astronomy, in: Erkenntnis 10, 1976, 323-336
- 1975 Zur Methodologie von Lakatos, Ms. März 1975
- 1976 Arbeitsbericht über das Projekt: Zum Begriff der elektrischen Leitfähigkeit; die Ohmsche Wende und ihre Vorgeschichte, Ms. Februar 1976
- 1976 Humphry Davy on Electric Conductivity, Ms. April 1976
- 1976 Kann die Reduktionsrelation wissenschaftliche Revolutionen überbrücken? Ohms Theorie als Beispiel. Ms. November 1976

Heisenberg, Werner

- 1971 Der Begriff 'abgeschlossene Theorie' in der modernen Naturwissenschaft, in: W.Heisenberg, Schritte über Grenzen, München

Heller, August

- 1884 Geschichte der Physik Bd.II, Stuttgart

Helmholtz, H.

- 1847 Über die Erhaltung der Kraft, Ostwalds Klassiker Nr. 1, Leipzig 1889

Hempel, Carl G.

- 1965 Aspects of Scientific Explanation, New York repr. 1970

Hennemann, Gerhard,

- 1959 Naturphilosophie im 19. Jhdt. Freiburg

Henrici, F.C.

- 1840 Über die Elektrizität der galvanischen Kette Göttingen

Hermann, Armin

- 1975 Dynamismus und Atomismus: Die beiden Systeme der Physik in der 1. Hälfte des 19.Jhds. in: Erkenntnis 10, 1976
- 1969 Physik im 19. Jahrhundert: Eigendynamik und Abhängigkeit der Entwicklung, in: Technikgeschichte in Einzeldarstellungen 11, Düsseldorf 1969, 95-116
- 1977 Die Aufnahme des Ohmschen Gesetzes, Elektrotechnische Zeitschrift, Ausgabe a, 98, 1977, 7-10

Hertz, Heinrich

- 1894 Die Prinzipien der Mechanik im neuen Zusammenhang dargestellt, Ges. Werke Bd.3, Leipzig

Hoppe, E.

- 1884 Geschichte der Electricität, Leipzig
- 1926 Geschichte der Physik, Braunschweig
- 1927 100 Jahre Ohmsches Gesetz, in: Elektrotechnische Zeitschrift 48, 1927, 561-563

- Huygens, Christiaan
1678 Abhandlung über das Licht, Ostwalds Klassiker
Leipzig 1903
- Jerusalem, Wilhelm
1924 Die soziologische Bedingtheit des Denkens und
der Denkformen, in Scheler 1924, 182-207
- Gehlen's Journal der Chemie, Physik und Mineralogie,
Berlin 1806-1810
- Gren's Journal der Physik, Leipzig 1790-1797
- Schweigger's Journal für Chemie und Physik, Nürnberg 1811ff
- Kämtz, Ludwig Friedrich
1828 (Besprechung der Galvanischen Kette von Ohm)
Allg. Literatur-Zeitung, Halle-Leipzig 1, 1828
Nr. 13f. Januar, S. 97-109
- 1840 Elektrizität, Artikel für Ersch & Grubers Encyclo-
pädie der Wissenschaften und Künste, Leipzig
151 Bde. 1818-1875, hier: 1. Sect. 33. Theil, 139-233
- Kant, Immanuel
1795 Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissen-
schaft, in: Kant, Werke in 10 Bd., hrsg. Wei-
schedel, Darmstadt Bd. 8, 11-135 (Orig. 1786)
- Kastner, C.W.G.
1828 Proteus: Zeitschrift für Geschichte der gesamm-
ten Naturlehre, Erlangen
- 1832/3 Grundzüge der Physik und Chemie zum Gebrauche
für höhere Lehranstalten, 2 Bde. Nürnberg
- Kilian, H.F.
1828 Die Universitäten Deutschlands in medicinisch-
naturwissenschaftlicher Hinsicht, Heidelberg/
Leipzig
- Kirchhoff, Gustav Robert
1876 Vorlesungen über mathematische Physik, Bd. 1
Mechanik, Leipzig
- Kistner, A.
1925 Deutsche Meister der Naturwissenschaft und
Technik Bd. 1, München
- Knight, David M.
1966 The Scientist as Sage, Studies in Romanticism
5, 1966, 65-88
- 1966 The Atomic Theory and the Elements, in: Stu-
dies in Romanticism 5, 1966, 185-207
- 1975 German Science in the Romantic Period, in:
Crosland 1975, 161-173
- Krüger, Lorenz
1974 Wissenschaftliche Revolutionen und Kontinui-
tät der Erfahrung, in: R. Bubner et al. hrsg.,
Neue Hefte für Philosophie 6/7: Tendenzen
der Wissenschaftstheorie, Göttingen 1-26

Kuhn, Thomas S.

- 1961 The Function of Measurement in Modern Physical Science, in: Isis 52, 161-193 (deutsch in Kuhn 1977, 254-307)
- 1962 Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen (3. deutsche Auflage, neu übersetzt, mit dem Nachwort von 1969) Frankfurt 1976
- 1973 Objektivität, Werturteil und Theoriewahl, in: Kuhn 1977, 421-445
- 1974 Neue Überlegungen zum Begriff des Paradigma, in: Kuhn 1977, 389-420
- 1970 Bemerkungen zu meinen Kritikern, in Lakatos 1974, 223-270
- 1975 Mathematische versus experimentelle Traditionen in der Entwicklung der physikalischen Wissenschaften, in: Kuhn 1977, 84-124
- 1976 Theory Change as Structure Change: Comments on the Sneed Formalism, in: Erkenntnis 10, 1976, 179-199
- 1977 Die Entstehung des Neuen: Studien zur Struktur der Wissenschaftsgeschichte, hrsg. Lorenz Krüger Frankfurt

Lakatos, Imre

- 1970a Falsifikation und die Methodologie der wissenschaftlichen Forschungsprogramme, in Lakatos 1974, 89-189
- 1970b Die Geschichte der Wissenschaft und ihre rationalen Rekonstruktionen, in: Lakatos 1974 271-311
- 1974 (zus. mit A. Musgrave, hrsg.) Kritik und Erkenntnisfortschritt, Braunschweig (engl. 1970)

Laudan, Laurens

- 1968 Theories of Scientific Method from Plato to Mach, in: History of Science 7, 1-63
- 1976 Two Dogmas of Methodology, in: Philosophy of Science 43, 1976, 585-597

Lepenes, Wolf

- 1976 Das Ende der Naturgeschichte, München/Wien

Liebig, J.

- 1863 Über Francis Bacon von Verulam und seine Methode der Naturforschung, München

Lorey, Wilhelm

- 1916 Das Studium der Mathematik an den deutschen Universitäten seit Anfang des 19. Jahrhunderts Leipzig

Luhmann, Niklas

- 1968 Selbststeuerung der Wissenschaft, in: Jahrbuch für Sozialwissenschaft 19, 147-170

McCormmach, R.K.

- 1967 The electrical researches of Henry Cavendish Cleveland

- McKnight, John L.
 1968 The Intellectual Development of Georg Simon Ohm, in: Actes du XI^e Congrès international d'histoire des sciences 1965, Wrocław 1968, 318-322
 1967 The Laboratory Notebooks of G.S.Ohm: A Case Study in Experimental Method, in: American Journal of Physics 35, 1967, 110-114
- Manegold, Karl-Heinz
 1969 Das Verhältnis von Naturwissenschaft und Technik im 19.Jhdt im Spiegel der Wissenschaftsorganisation. Technikgeschichte in Einzeldarstellungen Bd.2, Düsseldorf
- Mason, Stephen F.
 1962 A History of the Sciences (früherer Titel: Main Currents of Scientific Thought) rev.ed.1962, repr. 1975
- Mendelsohn, Everett
 1964 The Emergence of Science as a Profession in Nineteenth-Century Europe, in: Karl Hill (ed) The Management of Scientists, Evanston/Ill. 3-48
- Merz, John Theodore
 1965 A History of European Scientific Thought in the Nineteenth Century, Vol.I, New York 1.Ausg. 1904-12
- Moser, Ludwig
 1829 (Besprechung von Pohl 1826) in: Jahrbücher für wissenschaftliche Kritik, Stuttgart & Tübingen, Juli und August 1829, 109-127, 247-254, 257-270
- Mottelay, Paul Fleury
 1922 Bibliographical History of Electricity and Magnetism, London
- Muncke, G.W.
 1827 "Elektro-Magnetismus" in Gehler 1825-45, III, 1.Abt. 473-647
 1829/30 Handbuch der Naturlehre, 2 Teile, Heidelberg
 1836 "Magneto-Elektricität" in Gehler 1825-45, VI, 2.Abt. 1163-1196
 ibid.: "Elektromagnetismus", 693-710
 1836 "Materie", in: Gehler 1825-45, VI, 2.Abt., S. 1393-1472
- Neményi, P.F.
 1963 The Main Concepts and Ideas of Fluid Dynamics and their Historical Development, in: Archive for History of the Exact Sciences 2, 52-86
- Novalis (= Friedrich von Hardenberg)
 Schriften, hrsg. Kluckhohn & Samuel, 4 Bde., Leipzig 1929

- Ohm, Georg Simon
 1892 Gesammelte Abhandlungen, hrsg. E. Lommel, Leipzig
 1827 Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet, Berlin. Neudruck Leipzig/Wien 1887
 zit. nach Ohm 1892, 61-186
 1841 The Galvanic Circuit Investigated Mathematically, übs. William Francis, in: R.Taylor et al. (hrsg) Scientific Memoirs, Selected from the Transactions of Foreign Academies and Learned Societies and from Foreign Journals 2, London 401-506
 1847 Teoria matematica del circuito galvanico. Traduzione dal tedesco in parte inedita del Dr. Acilles Perugia, Pisa
 1854 Grundzüge der Physik als Compendium zu seinen Vorlesungen, 2 Teile in einem Band, Nürnberg
 1860 Théorie mathématique des courants électriques, übs. Jean-Mothée Gaugain, Paris
- Ostwald, Wilhelm
 1896 Elektrochemie: Ihre Geschichte und Lehre, Leipzig
- Pfaff, Christoph Heinrich
 1824 Der Elektro-Magnetismus, Hamburg
 1827 "Elektricität", "Elektrisirmaschine", "Elektricität, medicinische", "Elektricitätszeiger", in: Gehler 1825-45, III, 1. Abt. 233-389, 413-475, 390-ibid. 2. Abt.: "Elektrometer", "Elektrometrie", "Elektrophor", S. 648-784
 1828 "Galvanismus", in: Gehler 1825-45, IV, 2. Abt. 554-1011
 1831 "Leiter, Nichtleiter, Halbleiter" in: Gehler 1825-45, VI, 1. Abt., 133-221; "Luftelektricität" ibid. 465-514
 1836 "Säule", in: Gehler 1825-45, VIII, 1-161
 1837 Revision der Lehre vom Galvano-Voltaismus, Altona
 1845 Parallele der chemischen Theorie und der Volta'schen Kontakttheorie, Kiel
- Pfaff, Johann Wilhelm Andreas
 1828 (Besprechung von Ohm 1827), in: Kastner 1828, Bd. 1, Nr. 2, 349-377
- Pleßner, Helmuth
 1924 Zur Soziologie der modernen Forschung und ihrer Organisation in der deutschen Universität, in: Scheler 1924, 407-425
- Poggendorff, Johann Christ.
 1863ff. Biographisch-literarisches Handwörterbuch zur Geschichte der exacten Wissenschaften, Leipzig

- Pohl, Georg Friedrich
1826 Der Process der galvanischen Kette, Leipzig
1828 (Besprechung von Ohm 1827) in: Jahrbücher für wissenschaftliche Kritik, Stuttgart 1, Nr. 11-14 Jan. 1828, 85-103
1829 (Besprechung von Gehler, Band III, 1827) in: Jahrbücher für wissenschaftliche Kritik, Stuttgart und Tübingen, Juli und Sept. 1829 18-43; 417-426; 441-451
1829a Ansichten und Ergebnisse über Magnetismus, Electricität und Chemismus, Berlin
- Priestley, Joseph
1772 Geschichte und gegenwärtiger Zustand der Elektrizität nebst eigenthümlichen Versuchen Berlin/Stralsund 1772 (Übs. der 2. Aufl. 1769; 1. engl. Aufl. 1767)
- Putnam, Hilary
1974 The 'Corroboration' of Theories, in: Philosophical Papers Vol. 1, Cambridge 1976, 250-269 (Zuerst in: P. A. Schilpp (ed.), The Philosophy of Karl Popper II, LaSalle/ill. 1974)
- Rösling, Christian Lebrecht
1824 Der Galvanismus aus dem Dunkel in das Licht hervorgezogen, Ulm, 2 Teile
1804 Sammlung elektrischer Spielwerke für junge Elektriker, Nürnberg 9. Aufl.
1823 Kritische Prüfung und Berichtigung der bisherigen Electricitätslehre, Ulm
- Röttger, J. C.
1830 Kritik der mathematischen Naturlehre und Darstellung der gänzlich falschen Grundverfassung dieser Lehre, Neuhaldensleben
- Schäfer, Clemens
1924 Über Gauss' physikalische Arbeiten, in: Gauss, 1870ff. Werke Bd. XI, 2, Göttingen 1924-29, 109
- Schagrin, Morton L.
1963 Resistance to Ohm's Law, in: American Journal of Physics 31, 536-547
- Scheler, Max
1924 (Hrsg.) Versuche zu einer Soziologie des Wissens, München
1926 Probleme einer Soziologie des Wissens, in: ders., Die Wissensformen und die Gesellschaft, Leipzig
- Schelling, Friedrich W. J. von
1799 Erster Entwurf eines Systems der Naturphilosophie, Jena

- Schleiden, Mathias J.
 1842 Grundzüge der wissenschaftlichen Botanik,
 2.Aufl. Leipzig
 1844 Schellings und Hegels Verhältnis zur Natur-
 wissenschaft
- Schnabel, Franz
 1934 Deutsche Geschichte im Neunzehnten Jahrhundert
 3. Band: Erfahrungswissenschaften und Technik,
 Freiburg
- Schramm, Alfred
 1975 Theorienwandel oder Theorienfortschritt?
 (Diss.Graz) Wien
- Scott, Wilson L.
 1970 The Conflict of Atomism and Conservation
 Theory 1644-1860, London 1970
- Seyffer, Otto Ernst Julius,
 1848 Geschichtliche Darstellung des Galvanismus,
 Stuttgart und Tübingen
- Shedd, John C., Mayo D. Hershey, The History of Ohm's Law,
 in: Popular Science Monthly 83, 1913, 599-614
- Siegel, Karl
 1913 Geschichte der deutschen Naturphilosophie,
 Leipzig
- Singer, George John
 1814 Elements of Electricity and Electro-Chemistry,
 London
 1819 Elemente der Elektrizität und Elektro-Chemie,
 übs. und kommentiert von C.H.Müller, Breslau
- Sneed, Joseph D.
 1971 The Logical Structure of Mathematical Physics,
 Dordrecht
- Spaun, Franz von
 1817 Die Verschwörung gegen den gesunden Menschen-
 verstand, München
- Spiegel-Rösing, Ina S.
 1973 Wissenschaftsentwicklung und Wissenschafts-
 steuerung, Frankfurt
- Stauffer, R.G.
 1957 Speculation and experiment in the background
 of Oersted's discovery of electromagnetism,
 in: Isis 48, 33ff.
- Stegmüller, Wolfgang
 1973 Theorie und Erfahrung (Bd.II/2 von: Probleme
 und Resultate der Wissenschaftstheorie und
 analytischen Philosophie), Berlin/Heidelberg/
 New York 1973
 1974 Theoriendynamik und logisches Verständnis,
 in: Diederich 1974, 167-209
 1975a A Combined Approach to the Dynamics of Theories,
 Workshop Schloß Kronberg/Taunus, unveröff. Ms.
 1975b Structures and Dynamics of Theories: Some Re-
 flections on J.D.Sneed and T.S.Kuhn, in:
 Erkenntnis 9, 1975, 75-100
 1976 Accidental ('Non-Substantial') Theory Change
 and Theory Dislodgment, in: Erkenntnis 10, 1976,
 147-178

- Stehr, Mico & René König
1975 (hrsg) Wissenschaftssoziologie, Wiesbaden
- Teichmann, Jürgen
1974 Zur Entwicklung von Grundbegriffen der Elektrizitätslehre, insbesondere des elektrischen Stromes bis 1820, Hildesheim
- 1974 Beziehungen zwischen Johann Wilhelm Ritter und Alessandro Volta, Sudhoffs Archiv 58, 1974, 46-59
- 1976 150 Jahre Ohmsches Gesetz - 1826 bis 1976, Elektrotechnische Zeitschrift, Ausgabe a, 97, 1976, 594-600
- 1977 Zur Entdeckungsgeschichte des Ohmschen Gesetzes 1775-1826, Elektrotechnische Zeitschrift, Ausg. a, 1977, 4-7
- Thackray, A.
1970 Atoms and Powers: An Essay on Newtonian Matter-Theory and the Development of Chemistry, Cambridge/M. 1970
- Toulmin, Stephen S.
1967 Conceptual Revolutions in Science, in: R.S. Cohen & M.W. Wartofsky (hrsg.), Boston Studies in the Philosophy of Science III, Dordrecht 331-347
- 1970 Ist die Unterscheidung zwischen Normalwissenschaft und revolutionärer Wissenschaft stichhaltig?, in: Lakatos 1974
- Philosophical Transactions of the Royal Society, London 1665 ff.
- Unger, Franz
1939 Die Arbeiten von G.S. Ohm im Lichte der heutigen Technik, Elektrische Nachrichtentechnik 16, 1939, 65-68
- Vieth, Gerhard Ulrich Anton
1801-09 Physikalischer Kinderfreund, 10 Bände
Leipzig
- Weber, Joseph
1819 Das Wesen der Elektrizität, Sulzbach
- Weber, Wilhelm
1846 Elektrodynamische Maassbestimmungen über ein allgemeines Grundgesetz der elektrischen Wirkung, in: Heinrich Weber (hrsg.), Wilhelm Weber's Werke, 3. Band, Berlin 1893, 25-214
- Weber, Wilhelm, Rudolf Kohlrausch
1856 Über die Elektrizitätsmenge, welche bei galvanischen Strömen durch den Querschnitt der Kette fließt, in: Heinrich Weber (hrsg.), Wilhelm Weber's Werke 3. Bd., Berlin 1893, 597-608

- Wetzels, Walter D.
1973 Johann Wilhelm Ritter: Physik im Wirkungsfeld der deutschen Romantik, Berlin/New York
- Whittaker, E.
1951-53 A History of the theories of aether and electricity, 2 Bände, London
- Wiedemann, Gustav
1893/98 Die Lehre von der Elektrizität, 4 Bände Braunschweig
- Williams, L. Pearce
1962 The Physical Sciences in the First Half of the Nineteenth Century, in: History of Science Bd. I, 1-15
- Winkler, G.H.
1939 Die Ohm-Gedächtnisfeier in Berlin, in: Elektrotechnische Zeitschrift 60, 1939, 454
- Winter, H.J.J.
1943 The Significance of the Bakerian Lecture of 1843, in: London, Edinburg and Dublin Philosophical Journal of Science, 7th series, 34, 1943, 700-711
1944 The Reception of Ohm's Electrical Researches by his Contemporaries, in: Philosophical Magazine 35, 371-386
1948 The Work of G.T. Fechner on the Galvanic Circuit, in: Annals of Science 6, 1948, 197-205
- Wittgenstein, Ludwig
1953 Philosophische Untersuchungen, in: Schriften 1, Frankfurt 1960
- Wüllner,
1886 Lehrbuch der Experimental-Physik, Bd.4, Leipzig
- Yelin, Julius Conrad von
1822 Die Akademie der Wissenschaften und ihre Gegner, München

Lebenslauf von Michael Heidelberger

- 9.8.1947 Geburt in Karlsruhe als Sohn des
Gymnasialprofessors Albin Heidelberger
und seiner Frau Marianne, geb. Breig
- 1954-1958 Volksschule in Karlsruhe
- 1958-1966 humanistisches Bismarck-Gymnasium Karlsruhe
- ab WS 66/67 Studium der Philosophie, Mathematik und
Germanistik an der Universität Heidelberg.
Lehrveranstaltungen u.a. bei den Profes-
soren Tugendhat, Gadamer, Henrich, Gieß,
Henkel, Seifert, Böge
- ab WS 68/69 Studium der Philosophie, der Logik und Wis-
senschaftstheorie, und der Germanistik an
der Universität München
- WS 69/70 & SS 70 Studium an der Bowling Green State
University, Ohio, U.S.A., als Stipendiat
- ab WS 70/71 Weiterstudium in München: Philosophie,
Logik und Wissenschaftstheorie, neuere
deutsche Literaturgeschichte, Geschichte
der Naturwissenschaften. Lehrveranstaltungen
u.a. bei den Professoren Stegmüller, Käs-
bauer, Sneed, Essler, v. Savigny, Hoering,
Schütte, Schneider, Petri, Motekat
- 24.1.1973 Erlangung des Magistergrades der Universi-
tät München in Philosophie, Logik und Grund-
lagenforschung, neuere deutsche Literatur-
geschichte. Thema der Arbeit: "Zum Begriff
des Kriteriums in Wittgensteins Spätwerk"
- 1.10.73-31.3.74 Als wissenschaftliche Hilfskraft Verwalter
einer Assistentenstelle am Philosophischen
Seminar II der Universität München
- 1.11.74-30.6.78 Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Schwer-
punktprogramm 'Wissenschaftstheorie' der
Deutschen Forschungsgemeinschaft
- 1.2.-31.5.76 Forschungsaufenthalt an der Princeton
University, U.S.A. bei Prof. T.S.Kuhn
- ab 1.7.78 Verwalter der Dienstgeschäfte eines wissen-
schaftlichen Assistenten am Seminar für
Philosophie, Logik und Wissenschaftstheorie
der Universität München
- ab 1977 freier Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe
Didaktik des Deutschen Museums, München

